

Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava

Univerzitní studijní programy

**Sestavení funkční koncepce a vývoj
aplikačního software elektronického
systému servořízení elektromobilu
Democar**

**Assembling Functional Conception and
Development of the Application Software
for Electronic Power Steering System of
the Electric Vehicle
Democar**

Student

Bc. David Dulanský

Vedoucí diplomové práce

Ing. Petr Šimoník, Ph.D.

Ostrava 2016

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. David Dulanský**

Studijní program: N3943 Mechatronika

Studijní obor: 3906T007 Automobilová elektronika

Téma: Sestavení funkční koncepce a vývoj aplikačního software elektronického systému servořízení elektromobilu Democar
Assembling Functional Conception and Development of the Application Software for Electronic Power Steering System of the Electric Vehicle Democar

Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

1. Na základě doporučení vedoucího diplomové práce a respektováním současného řešení, proveďte teoretický návrh celkové koncepce elektronického servořízení s elektronickým posilovačem MOBIS pro vozidlo Democar. Analyzujte chování posilovače MOBIS pro jeho nejvhodnější integraci a provozní řízení. Sestavte výčet provozních rizik.
2. Proveďte praktickou realizaci prototypu a zástavbu komplexního systému servořízení s elektronickým posilovačem. Modifikujte stávající řídicí jednotku elektronického servořízení.
3. Na realizovaném prototypu proveďte vývoj řídicího software s možností zadávání povelů od nadřazeného řídicího systému.
4. Experimentálně ověřte funkčnost vyvinutého prototypu při reálných jízdních podmínkách.

Seznam doporučené odborné literatury:

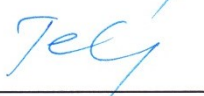
- [1] ERJAVEC, J.: Automotive Technology: A Systems Approach, 4th Edition, USA 2004, Thomson Learning, 1401 p., ISBN 1-4018-4831-1
- [2] RIBBENS, B., W.: Understanding Automotive Electronics, Sixth Edition, USA 2003, Elsevier Science, 480 p., ISBN 0-7506-7599-3
- [3] DENTOM, T.: Automotive Technology: Advanced Automotive Fault Diagnosis, 2th Edition, USA 2004, Butterworth-Heinemann Ltd. 2006, 288 p., ISBN 0-7506-6991-8
- [4] Robert Bosch GmbH: Bosch Yellow Jackets Series, Bosch Technical Literature, 1996-2014
- [5] Stockel, W., M., Stockel, T., M., Johanson, Ch.: Auto Diagnosis, Service, and Repair, 7th Edition, Goodheart-Willcox, USA 2003, 1024 p., ISBN 978-1566379106
- [6] Dentom, T.: Automotive Technology: Advanced Automotive Fault Diagnosis, 2th Edition, USA 2004, Butterworth-Heinemann Ltd. 2006, 288 p., ISBN 0-7506-6991-8

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Petr Šimoník, Ph.D.**

Datum zadání: 20.10.2015

Datum odevzdání: 16.05.2016



doc. Ing. Petr Palacký, Ph.D.
vedoucí katedry

VYSOKÁ ŠKOLA BAŇSKÁ
TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA
708 33 Ostrava-Poruba
17 listopadu 15/2172



prof. Ing. Petr Noskovič, CSc.
prorektor pro studium

Místopřísežné prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně pod vedením Ing. Petra Šimoníka, Ph.D. a uvedl v seznamu literatury všechny použité literární prameny a zdroje, ze kterých jsem čerpal.

V Ostravě dne 16. května 2016

.....*David Dulanský*.....
Bc. David Dulanský

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č.121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 –školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že diplomová práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě dne 16. května 2016

Jméno a příjmení autora práce
Adresa trvalého bydliště autora


.....
Bc. David Dulanský

Bc. David Dulanský
Vrchlického 192/3, 74301
Bílovec

Poděkování

Děkuji vedoucímu této diplomové práce panu Ing. Petru Šimoníkovi, Ph.D. za cenné rady, připomínky a věnovaný čas. Dále děkuji panu Ing. Jiřímu Takáčovi, Ing. Tomáši Mrovčovi a Ing. Lukáši Cábovi za odborné rady při praktické realizaci práce. Panu Ing. Janu Gebauerovi děkuji za ochotné zapůjčení měřicích přístrojů. Dále děkuji panu RNDr. Daliboru Ciprianovi, Ph.D. za konzultaci technických výpočtů. V neposlední řadě děkuji Bc. Samueli Przeczkovi a Bc. Ondřeji Wolfovi za náměty a připomínky při realizaci spolupráce řídicích systémů a celé své rodině za podporu při studiu.

Anotace

DULANSKÝ, David. *Sestavení funkční koncepce a vývoj aplikačního software elektronického systému servořízení elektromobilu Democar*. Ostrava, 2016. Diplomová práce. Vysoká škola báňská — Technická univerzita Ostrava. Vedoucí práce Ing. Petr Šimoník, Ph.D.

Diplomová práce se zabývá systémem servořízení elektromobilu Democar. Navazuje na předchozí řešení a systém servořízení doplňuje o elektronický posilovač řízení. Úvodní část je věnována analýze zvoleného posilovače řízení, jeho konstrukci a komunikačnímu rozhraní. Následující kapitoly jsou věnovány výpočtům, na jejichž základě byly stanoveny potřebné vstupní parametry ovládajících akčních členů systému servořízení. Druhá část práce je věnována vývoji aplikačního software pro řídicí jednotku systému. Důraz je kladen především na řešení otázky bezpečnosti systému a jsou diskutovány možné závady, které se mohou během provozu vozidla vyskytnout. Závěrečná kapitola byla věnována ověření vyvinutého aplikačního softwaru a celého systému.

Klíčová slova

CAN, posilovač řízení, MXQ, software, elektromobil, řídicí jednotka, servořízení

Annotation

DULANSKÝ, David. *Assembling Functional Conception and Development of the Application Software for Electronic Power Steering System of the Electric Vehicle Democar*. Ostrava, 2016. Diploma thesis. VŠB - Technical University of Ostrava. Thesis head Ing. Petr Šimoník, Ph.D.

The diploma thesis deals with power-assisted steering Democar electric car. The already developed system is completed with motor-driven power steering booster. The thesis is divided in two parts. The first part is oriented on the analysis of the chosen steering booster, especially on its construction and communication interface. The following text deals with the model computation subsequently used to determine the input parameters of steering actuators. The second part of the thesis is focused on control unit application software development. The emphasis is put on the security of the steering and possible operation failures of the system are discussed. The concluding chapter deals with the testing of the developed application software and the complete steering system.

Keywords

CAN, power steering, MQX, software, electric car, control unit, steering

Seznam použitých symbolů a zkratk

AC	Střídavý proud (z ang. Alternating Current)
α	Odklon spojovací tyče od vodorovné roviny [°]
BCU	Řídicí jednotka brzdového systému (z ang. Brake Control Unit)
CAN	Datová sběrnice využívaná v oblasti automotive (z ang. Controller Area Network)
CAN PR	Datová sběrnice CAN využívaná ke komunikaci mezi posilovačem řízení a řídicí jednotkou SCU
CCU	Centrální řídicí jednotka (z ang. Central Control Unit)
DC	Stejnoseměrný proud (z ang. Direct Current)
DCU	Řídicí jednotka pohonu (z ang. Drive Control Unit)
DPS	Deska plošného spoje
dS	Elementární dotyková ploška [m ²]
dx	Délka hrany elementární dotykové plošky v ose x [m]
dy	Délka hrany elementární plošky v ose y [m]
EMCU	Řídicí jednotka napájecího systému (z ang. Energy Management Control Unit)
η	Účinnost šroubového převodu lineárního vedení [–]
\mathbf{F}	Vektor síly vyvolávající krouticí moment [N]
F	Síla působící ve spojovací tyči řízení změřená tenzometrickým snímačem [N]
f	Součinitel smykového tření [–]
F_{jez}	Požadovaná síla působící ve směru jezdce lineárního vedení [N]
FM	Frekvenční měnič
$F_{\text{tyč}}$	Síla působící ve spojovací tyči řízení [N]
F_x	Momentotvorná složka síly F [N]
F_z	Zatěžovací síla nápravy [N]
F_{z1}	Zatěžovací síla pravého kola po směru jízdy [N]
F_{z2}	Zatěžovací síla levého kola po směru jízdy [N]
g	Gravitační zrychlení ($g = 9,82 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$)
h	Stoupání šroubu lineárního vedení [m]
ID	Zkratka vyjadřující identifikaci (z ang. Identification)
KM	Krokový motor

l	Výstupní rameno páky natáčecího mechanismu[N]
LCU	Řídicí jednotka osvětlovacího systému (z ang. Light Control Unit)
LED	Dioda emitující světlo (z ang. Light Emitting Diode)
LIN	Sériová asynchronní sběrnice (z ang. Local Interconnect Network)
l_{ovl}	Rameno ovládací páky mechanismu servořízení [m]
\mathbf{M}	Vektor krouticího momentu [Nm]
M	Výsledný třecí moment [Nm]
M_i	Jednotlivé dílčí momenty, kterými přispívá každá dotyková plocha pneumatiky [Nm]
M_{km}	Minimální požadovaný krouticí moment ovládacího krokového motoru [Nm]
M_{min}	Minimální požadovaný krouticí moment [Nm]
M_{vst}	Vstupní krouticí moment před posilovačem řízení [Nm]
M_{vyst}	Výstupní krouticí moment za posilovačem řízení [Nm]
m_1	Hmotnost připadající na pravé kolo přední nápravy po směru jízdy [kg]
m_2	Hmotnost připadající na levé kolo přední nápravy po směru jízdy [kg]
n	Počet kroků ovládacího krokového motoru za 1 sekundu [–]
$n_{\mu s}$	Počet mikrokroků ovládacího krokového motoru [–]
ω	Rychlost ovládacího krokového motoru [ot/s]
p	Tlak na styčnou plochu S vyvolaný zatížením pneumatiky [Pa]
PID	Označení typu regulátoru složeného z proporcionální, integrační a derivační složky
PM SM	Synchronní motor s permanentními magnety
PŘ	Posilovač řízení
RS 485	Sériová komunikační sběrnice
\mathbf{r}	Polohový vektor
r	Velikost polohového vektoru elementární dotykové plošky [m]
ŘJ	Řídicí jednotka
S	Styčná plocha pneumatiky a podložky [m ²]
S_{1-4}	Obsahy styčných ploch pneumatiky a podložky [mm ²]
SCU	Řídicí jednotka servořízení s posilovačem řízení (z ang. Steering Control Unit)
UART	Asynchronní sériové rozhraní (z ang. Universal Asynchronous Receiver and Transmitter)

x	Vzdálenost elementární dotykové plošky od středu otáčení pneumatiky ve směru osy x [m]
y	Vzdálenost elementární dotykové plošky od středu otáčení pneumatiky ve směru osy y [m]
Z	Zesílení posilovače řízení [-]

Obsah

Úvod.....	11
1 Struktura elektronických systémů elektromobilu Democar	12
2 Návrh elektronického systému servořízení	13
2.1 Stávající řešení elektronického systému servořízení.....	13
2.2 Návrh nové koncepce elektronického servořízení	14
3 Analýza posilovače řízení MOBIS	16
3.1 Konstrukce	16
3.2 Analýza komunikace posilovače řízení.....	17
3.3 Převodní charakteristiky posilovače řízení	19
4 Modifikace požadavků na ovládací krokový motor mechanismu servořízení	24
4.1 Výpočet minimální síly potřebné k natočení kol	24
4.2 Stanovení maximální rychlosti ovládacího krokového motoru mechanismu servořízení	29
5 Vývoj software systému servořízení s posilovačem elektromobilu Democar.....	32
5.1 Původní řešení software systému servořízení elektromobilu Democar	32
5.2 Řídicí jednotka SCU	33
5.3 Operační systém jednotky SCU	34
5.4 Návrh software systému servořízení s posilovačem elektromobilu Democar	35
5.5 Funkční bezpečnost systému.....	39
5.6 Spolupráce jednotky SCU s ostatními řídicími jednotkami elektromobilu Democar	43
6 Ověření funkčnosti systému	46
7 Závěr.....	51
8 Literatura	52
9 Seznam příloh.....	54

Úvod

Elektronické systémy mají v dnešní koncepci vozidel nezastupitelný význam. Zabudováním řídicích elektronických systémů do vozidel bylo dosaženo nejen zvýšení uživatelského komfortu, bezpečnosti a v některých případech zlepšení provozně ekonomického hlediska. Sofistikované řídicí systémy značně ulehčují řidiči ovládání vozidla a jeho pozornost může být mnohem více využita pro pozorování dopravní situace kolem vozidla. [6]

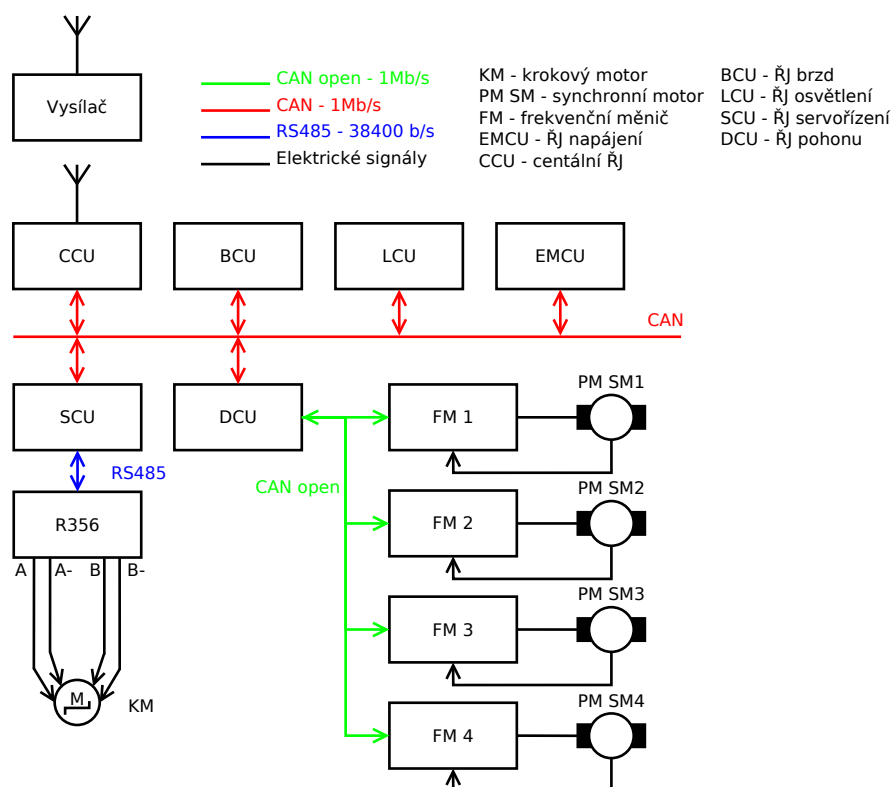
Jedním z nejdůležitějších systémů je systém umožňující manévrování vozidla. Pro elektromobil Democar byl navržen systém řízení pomocí elektronického servopohonu – Steer by Wire. Tento koncept odstraňuje mechanickou vazbu mezi řidičem a natáčecí nápravou vozidla. Natáčení řiditelných náprav zabezpečuje elektronický systém na základě zpracování požadavku řidiče. Celkový návrh tohoto systému byl diskutován a vyvinut na základě diplomových prací pana Ing. Jakuba Formánka [1] a pana Ing. Jiřího Kováče. [2] V praxi se ukázalo, že zabudovaný koncept servořízení nedisponuje dostatečnou dynamikou (díky mikro-krokování, řešeném pro realizaci dostatečné síly a ne zcela vhodném řešení aplikačního software), které by bylo u tohoto systému zapotřebí. Řešením je doplnění systému o sofistikovaný elektronický posilovač a vývoj nového aplikačního software. Inovovaný návrh byl proveden na základě nových výpočtů sil a momentů jednotlivých úrovní celého systému. Tato diplomová práce tak navazuje na předchozí řešení a zabývá se otázkou rozšíření stávajícího systému řízení. Cílem této práce je především sestavení nové funkční koncepce elektronického servořízení, doplněného o elektronický posilovač a vývoj aplikačního software respektujícího požadavky na vzájemnou spolupráci ostatních elektronických systémů. Byly respektovány požadavky na zlepšení dynamiky řízení a bezpečnosti elektromobilu Democar.

1 Struktura elektronických systémů elektromobilu Democar

Democar je elektromobil vyvíjený pod záštitou Fakulty elektroniky a informatiky VŠB-TU. Vozidlo není koncipováno tak, aby prošlo homologační zkouškou pro provoz na pozemních komunikacích, ale slouží zejména pro demonstrační účely spojené s prezentací Katedry elektroniky VŠB-TU oboru automobilová elektronika. Současně poskytuje koncept pro vývoj jak hardwaru, tak softwaru řídicích jednotek. Během realizace tohoto projektu byly pro vozidlo Democar vyvinuty specifické řídicí jednotky a řídicí algoritmy, které mohou být později dále využity pro vývoj nové technologie či elektronického systému.

Elektromobil Democar je koncepčně řešen jako čtyřkolka řízená bezdrátově skrze rádiovou vysílačku. Vozidlo je vybaveno nezávislým pohonem jednotlivých kol, pomocí čtyř synchronních motorů Baumüller DSC100P, každý o výkonu 4,2 kW. Tyto motory jsou řízeny pomocí čtyř frekvenčních měničů BM 4223 rovněž firmy Baumüller. Napájení vozu zajišťují baterie konstrukce Li-Fe-Po4 (napájení pohonu 540V 20Ah, napájení palubní sítě 12V 80Ah a 24V 40Ah). Ovládání vozidla je řešeno pomocí 16ti kanálové vysílačky která, komunikuje s elektronickými systémy vozidla skrze řídicí jednotku centrální elektroniky (CCU). Dálkovým ovladačem lze ovládat řízení pohonu (DCU), elektronické servořízení (SCU), brzdy (BCU) a osvětlení elektromobilu (LCU). Jednotlivé údaje telemetrie lze sledovat na displeji vysílačky.

Jednotlivé elektronické řídicí systémy tvoří uzavřené funkční systémy vozidla. Spolupráce mezi nimi je zprostředkována automobilovou sběrníci CAN, pomocí níž veškeré řídicí jednotky komunikují a vyměňují si skrze datové rámce zakódované informace potřebné k řízení akčních členů.



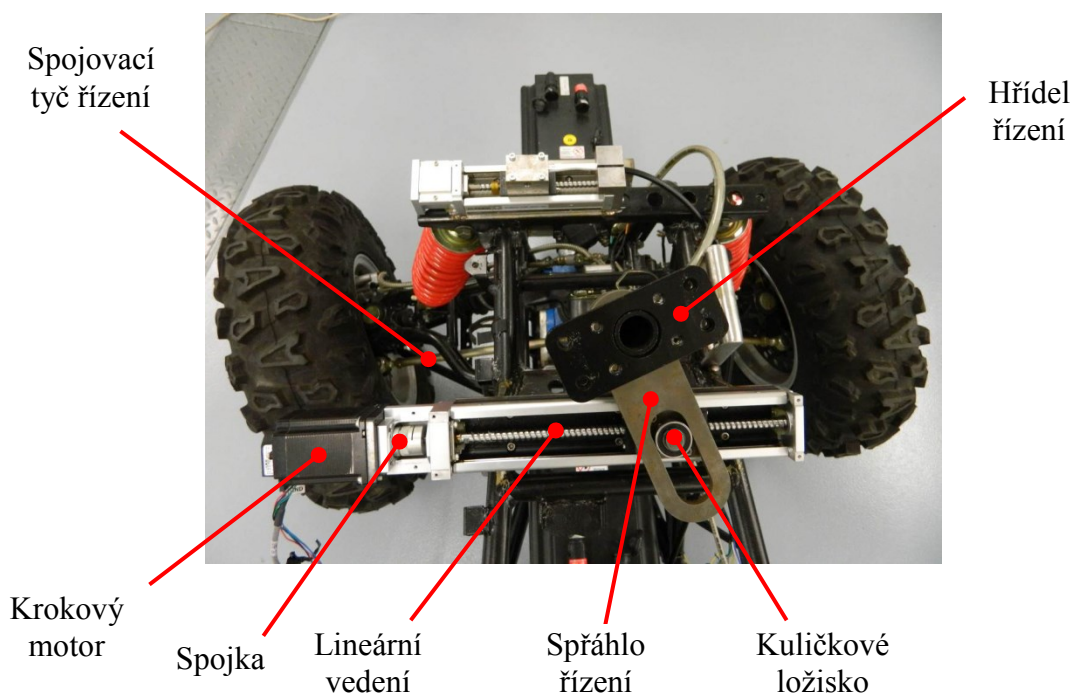
Obrázek 1: Celková koncepce elektronických systémů vozidla Democar

2 Návrh elektronického systému servořízení

Systém elektronického servořízení je jedním z klíčových systémů, kterým je elektromobil Democar osazen. Bez něj by nebylo možné ovládat směr pohybu vozidla. Jeho odezva proto musí být velice rychlá, neboť funkčnost tohoto systému úzce souvisí s bezpečností provozu vozidla.

2.1 Stávající řešení elektronického systému servořízení

Systém řízení je nyní řešen pomocí krokového motoru LIN Engineering 5718L-01P a speciálního natáčecího mechanismu. Příkazy zasílané pomocí bezdrátového vysílacího modulu jsou zpracovány řídicí jednotkou řízení (SCU). Řídicí jednotka komunikuje se speciálním kontrolérem pro krokové motory R356 pomocí sběrnice RS485. Rotační pohyb krokového motoru je pomocí lineárního vedení SG3305A-500P značky Kuroda převáděn na lineární - posuvný. Posuvný segment lineárního vedení je pomocí speciálního spřáhla spojen s hřídelem řízení. Přenos síly mezi posuvným segmentem lineárního vedení a natáčecím spřáhlem je zprostředkován pomocí jednořadého kuličkového ložiska 6002-2RSH firmy SKF.



Obrázek 2: Stávající koncepce řízení elektromobilu Democar [2]

Systém elektronického servořízení ve stávajícím provedení vykazuje nedostatečnou dynamiku natáčení kol vozidla. Krokový motor musí být vzhledem ke své momentově rychlostní charakteristice provozován při nízkých rychlostech. Praktickou analýzou při jízdách testech bylo zjištěno, že rychlost natáčení kol je nedostatečná.

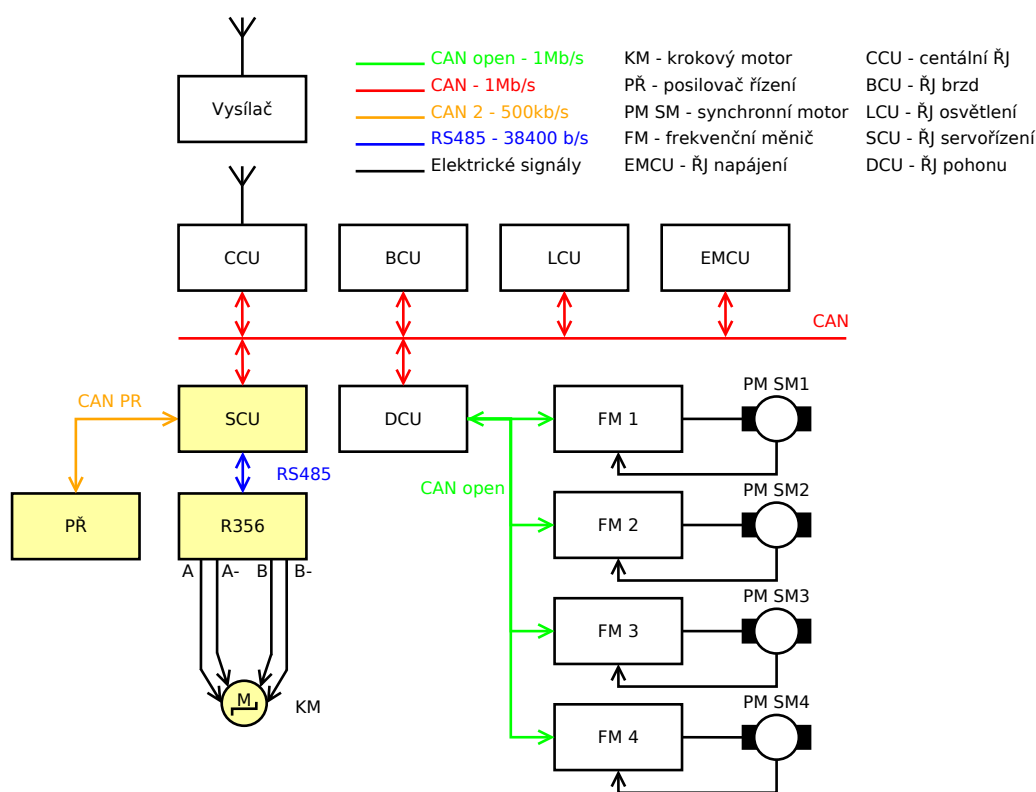
2.2 Návrh nové koncepce elektronického servořízení

Inovace stávajícího konceptu elektronického servořízení si klade za cíl zvýšit rychlost natáčení kol a tím dynamiku celého systému. Prakticky je možné dosáhnout zlepšení dynamiky systému řízení třemi způsoby – zabudováním elektromotoru pro natáčení kol s větším jmenovitým točivým momentem (v případě užití elektromotoru s nedostatečně dimenzovaným krouticím momentem), zabudováním lineárního vedení s větším stoupáním (což zvyšuje opět nároky na jmenovitý krouticí moment elektromotoru pro ovládání natáčení kol), nebo zvýšit krouticí moment na tyči řízení. Při dosažení vyššího krouticího momentu na tyči řízení bude možné provozovat stávající krokový motor při vyšší rychlosti. Dosažení vyšší síly působící na rejdový čep kola lze realizovat pomocí posilovače řízení.

Vzhledem k tomu, že vozidlo je již krokovým motorem i lineárním vedením vybaveno, bylo rozhodnuto, že stávající komponenty řízení budou s ohledem na vyhovující rozměry a finanční hospodárnost projektu zachovány. Z těchto důvodů bylo zvoleno využití posilovače řízení.

Jako nejvhodnější typ posilovače řízení pro elektromobil Democar byl vybrán posilovač řízení umístěný na sloupku řízení. Jeho hlavní přednosti spočívají v malých rozměrech a jednoduchosti provedení. Posilovač je schopen komunikovat s ostatními systémy elektromobilu Democar skrze automobilovou sběrnici CAN. Další výhodou je, že posilovač nepotřebuje žádné přídavné hydraulické okruhy, které by celý koncept zabudování posilovače do elektromobilu značně zkomplikovaly a zbytečně by elektromobil zatěžovaly další přidanou hmotností.

Na základě této analýzy byl vybrán pro svou dostupnost posilovač řízení vozidla Hyundai i30 firmy MOBIS s typovým označením MPS0002A AA670 565 HMEA1 2L563-98000 2L563-98010 4FDL0805 FFDK0803.



Obrázek 3: Blokové schéma navržené nové koncepce řídicích jednotek elektromobilu Democar

Posilovač řízení bude zabudován do řídicí tyče elektromobilu Democar. Pro jeho napájení bude využito jmenovité napětí 12 V.

3 Analýza posilovače řízení MOBIS

Vybraný posilovač řízení pro zástavbu do elektromobilu Democar byl podroben analýze z důvodu dimenzování posilovacího účinku a ověření nárůstu silových účinků v mechanismu natáčení kol.

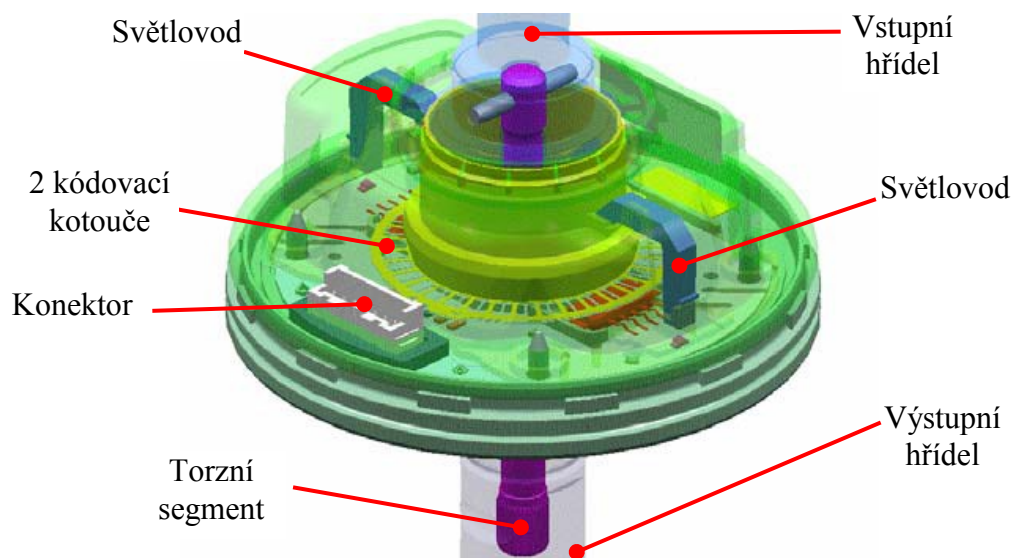
3.1 Konstrukce

Konstrukčně se jedná o elektrický posilovač řízení zabudovaný do sloupku řízení. Elektromotor, který vyvíjí posilovací účinek, je bezkartáčový střídavý motor se zabudovaným DC/AC měničem. V konstrukci motoru je rovněž zabudován senzor polohy rotoru. [8]

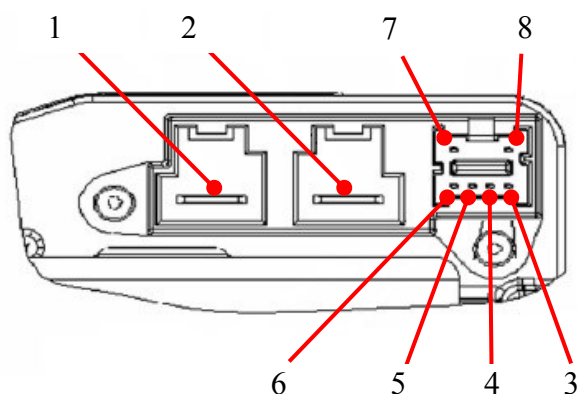
Tabulka 1: Konstrukční parametry elektromotoru posilovače řízení MOBIS

Parametr	Hodnota
Maximální proud motoru	45 A
Průměr	86,5 mm
Délka	55 mm
Hmotnost	2 kg
Jmenovitý krouticí moment	58 Nm

Součástí posilovače řízení je také snímač krouticího momentu na tyči řízení. Konstrukčně je tento snímač tvořen dvěma disky se šterbinami. Prostřednictvím dvou světlovodů je skrze tyto disky veden paprsek světla vytvořený LED diodou a následně detekován fotodiodou. Díky posunutí kotoučů vypočítává řídicí jednotka úhel jejich natočení a krouticí moment v řízení.



Obrázek 4: Senzor krouticího momentu řízení [8]



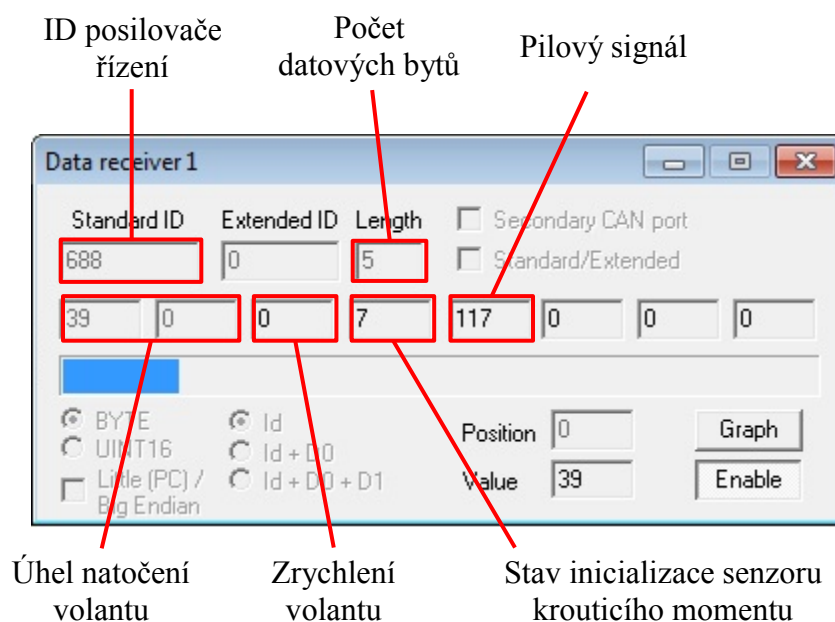
1 – napájení (+), 2 – napájení (-), 3 CAN High, 4 – CAN2 Low (nezapojeno), 5 – vstup spínače zapalování, 6 – CAN Low, 7 – CAN2 High (nezapojeno), 8 – náhradní konektor (nezapojeno)

Obrázek 5: Pinout elektronického posilovače řízení MOBIS [8]

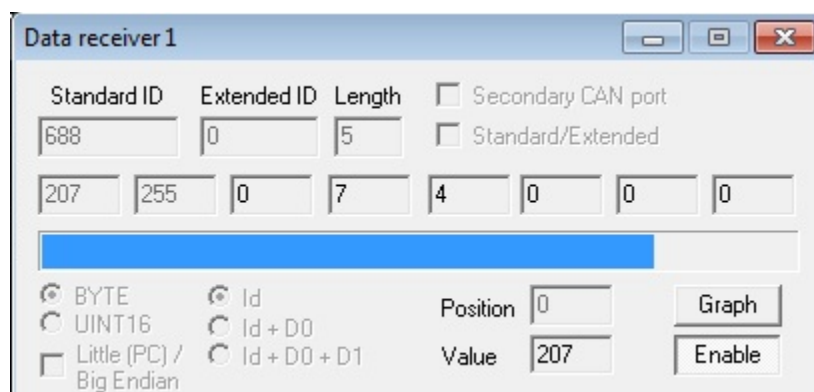
3.2 Analýza komunikace posilovače řízení

Komunikace probíhající mezi řídicí jednotkou posilovače řízení a řídicí jednotkou SCU elektromobilu Democar je řešena skrze automobilovou sběrnici CAN. Ta byla analyzována s využitím CAN analyzátoru/emulátoru (interface USB2CAN se software PP2CAN). Komunikace probíhá rychlostí 500 Kb/s. Dále byly zjištěny datové rámce a jejich identifikátory náležící řídicí jednotce posilovače řízení, pomocí níž vysílá a přijímá posilovač řízení data. K této analýze byla s výhodou využita funkce softwaru PP2CAN – ID trap. Bylo zjištěno, že řídicí jednotka servořízení komunikuje prostřednictvím datových rámců označených identifikátorem 688. Poté byla zaznamenána komunikace posilovače

řízení zabudovaného do automobilu Hyundai i30 ve fázi zapnutí zapalování, startování a jízdě automobilu. Následně byly tyto data využity k analýze významu jednotlivých datových bytů komunikace. S řídicí jednotkou posilovače řízení elektromobilu Democar byla navázána komunikace prostřednictvím diagnostického přístroje BOSH KTS 540. Na základě zobrazovaných údajů diagnostickým přístrojem a změnou datových bytů komunikace byl analyzován význam bytů komunikace ŘJ posilovače řízení.



Obrázek 6: Odezva řídicí jednotky posilovače řízení při natočení kol doleva



Obrázek 7: Odezva řídicí jednotky posilovače řízení při natočení kol doprava

Z obrázku č. 6 a obrázku č. 7 je patrný význam jednotlivých datových bytů CAN zprávy posilovače řízení. V prvních dvou datových bytech je zakódován úhel natočení volantu tak, že pokud natáčíme volantem doleva, inkrementuje se hodnota prvního datového bytu, pokud dosáhne hodnoty 255 (maximální velikost bytu), druhý datový byte se inkrementuje. Poté se opět inkrementuje hodnota prvního datového bytu. Pokud natočíme volant doprava, probíhá určení úhlu natočení volantu obdobně, jen se při

překročení maximální hodnoty prvního datového bytu, hodnota druhého datového bytu dekrementuje z hodnoty 255.

V pořadí čtvrtý datový byte (jehož hodnota je na obrázku č. 6 a obrázku č. 7 rovna 7) udává, že senzor krouticího momentu řízení, respektive úhlu natočení volantu je správně inicializován. Pokud tomu tak není, jeho hodnota je rovna číslu 6. Je nutné provést jeho inicializaci natočením volantu do obou krajních poloh, tedy na maximální rejď vpravo a následně vlevo. Tento stav nastává, dojde-li k výpadku stálého napájecího napětí posilovače řízení.

3.3 Převodní charakteristiky posilovače řízení

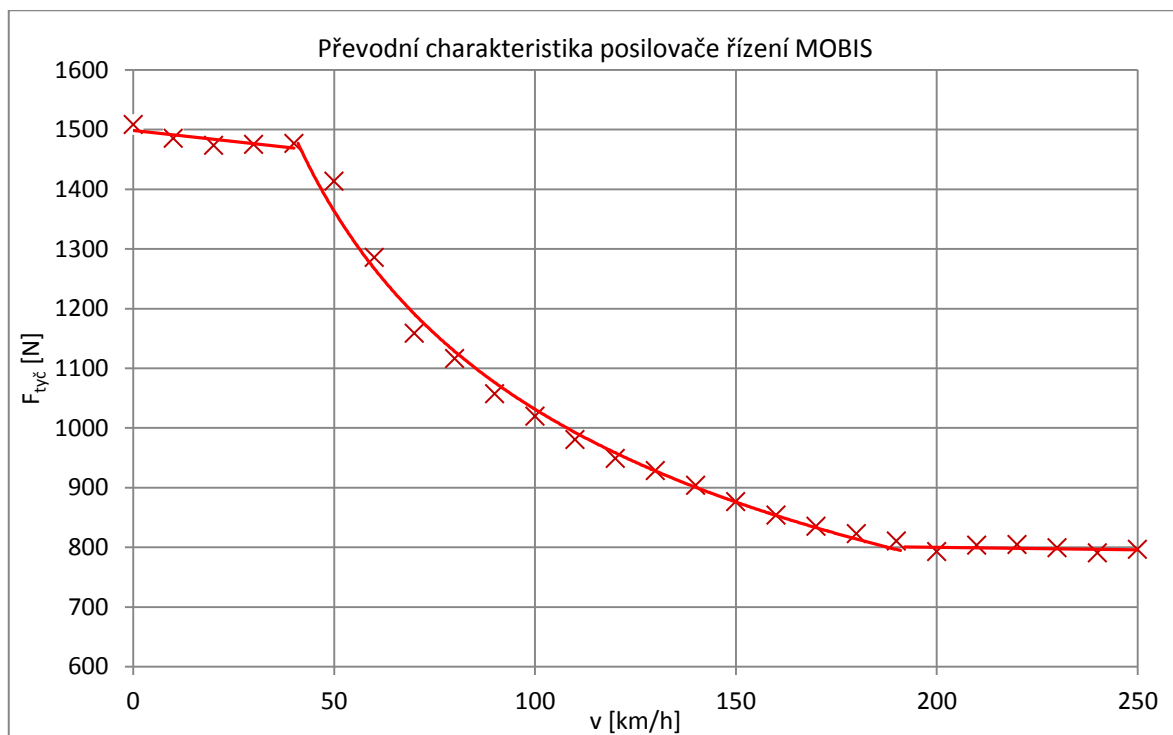
Vybraný elektrický posilovač řízení disponuje funkcí proměnného posilovacího účinku v závislosti na rychlosti vozidla. K zjištění zesílení krouticího momentu v mechanismu řízení byl využit tenzometrický snímač Megatron K1505 propojený se zobrazovací jednotkou MODIG M 107, pomocí něhož byla měřena výstupní síla přenášená skrze pákový mechanismus na spojovací tyč řízení.

Pro vyvolání zátěže byla kola elektromobilu Democar mechanicky zablokována. Pomocí analogového siloměru a tyče o délce 0,5 m, která byla instalována do osy řízení, byl nastavován vstupní krouticí moment 24,52 Nm. Zároveň byla pomocí softwaru PP2CAN vysílána řídicí jednotce posilovače řízení informace o rychlosti vozidla skrze sběrnici CAN.



Obrázek 8: Snímač síly MEGATRON K1505

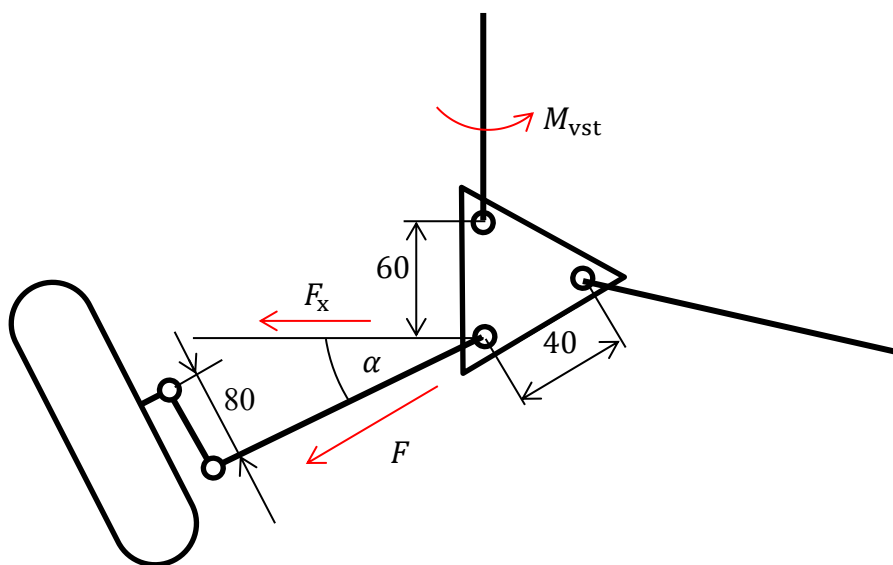
Měření síly ve spojovací tyči řízení bylo provedeno sedmkrát z důvodu eliminace chyb měření. Výsledky měření jsou vyobrazeny v grafické podobě na obrázku č. 9, kde je vyobrazena průměrná hodnota všech měření.



Obrázek 9: Převodní charakteristika posilovače řízení MOBIS

Z grafu na obrázku č. 9 je patrné, že do rychlosti 50 km/h je posilovací účinek přibližně konstantní. Při dalším zvyšování rychlosti se posilovací účinek exponenciálně snižuje. Od rychlosti 200 km/h zůstává posilovací účinek opět konstantní.

Na základě znalosti vstupního krouticího momentu a geometrie řízení byla určena charakteristika zesílení posilovače řízení v závislosti na rychlosti vozidla.



Obrázek 10: Schéma natáčecího mechanismu na výstupu posilovače řízení

Výstupní krouticí moment posilovače řízení byl určen dle vztahů:

$$M_{\text{vyst}} = F_x \cdot l \quad (1)$$

kde: M_{vyst} je výstupní krouticí moment za posilovačem řízení [Nm],

F_x je momentotvorná složka síly F [N],

l je výstupní rameno páky natáčečního mechanismu [N].

$$F_x = F \cdot \cos \alpha \quad [\text{N}] \quad (2)$$

kde: F_x je momentotvorná složka síly F [N] ,

F je síla působící ve spojovací tyči řízení změřená tenzometrickým snímačem [N],

α odklon spojovací tyče od vodorovné roviny [°].

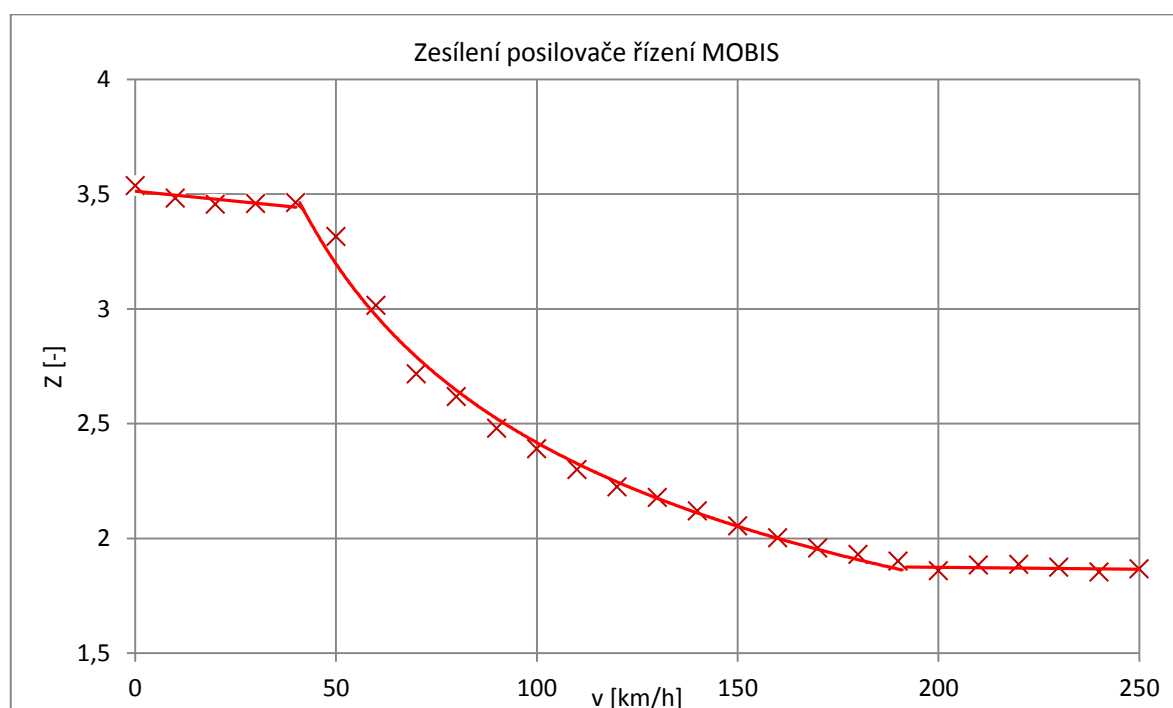
Zesílení posilovače řízení bylo určeno dle vztahu:

$$Z = \frac{M_{\text{vyst}}}{M_{\text{vst}}} \quad (3)$$

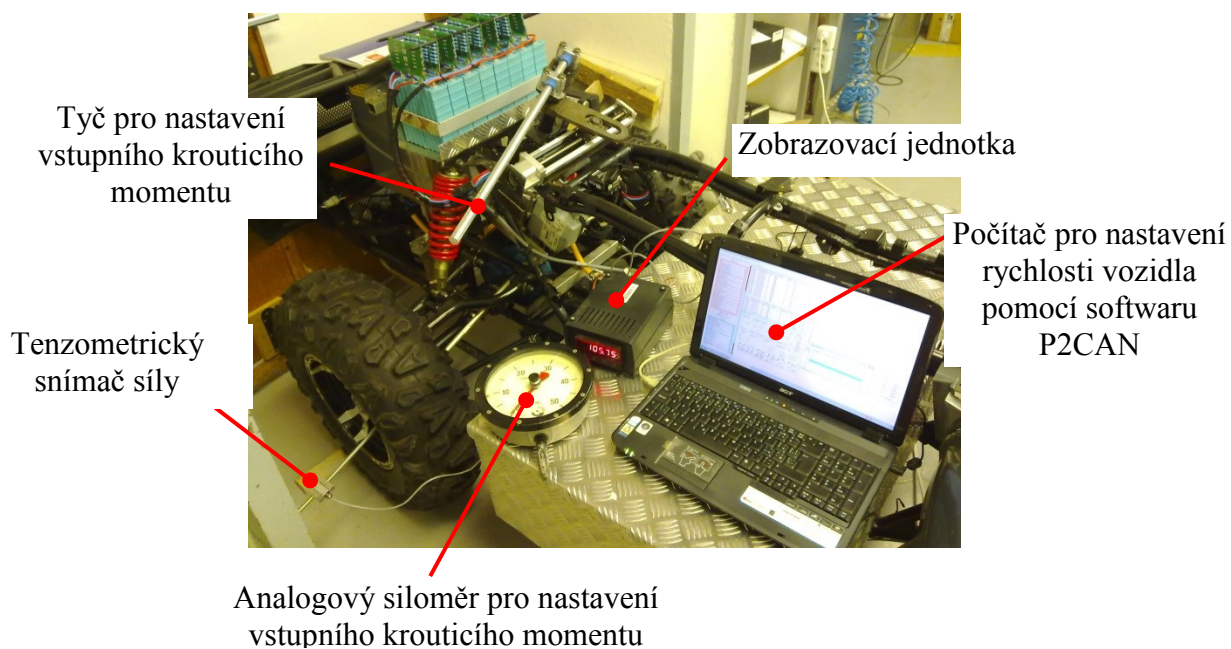
kde: Z je zesílení posilovače řízení [-],

M_{vyst} je výstupní krouticí moment za posilovačem řízení [Nm],

M_{vst} je vstupní krouticí moment před posilovačem řízení [Nm].

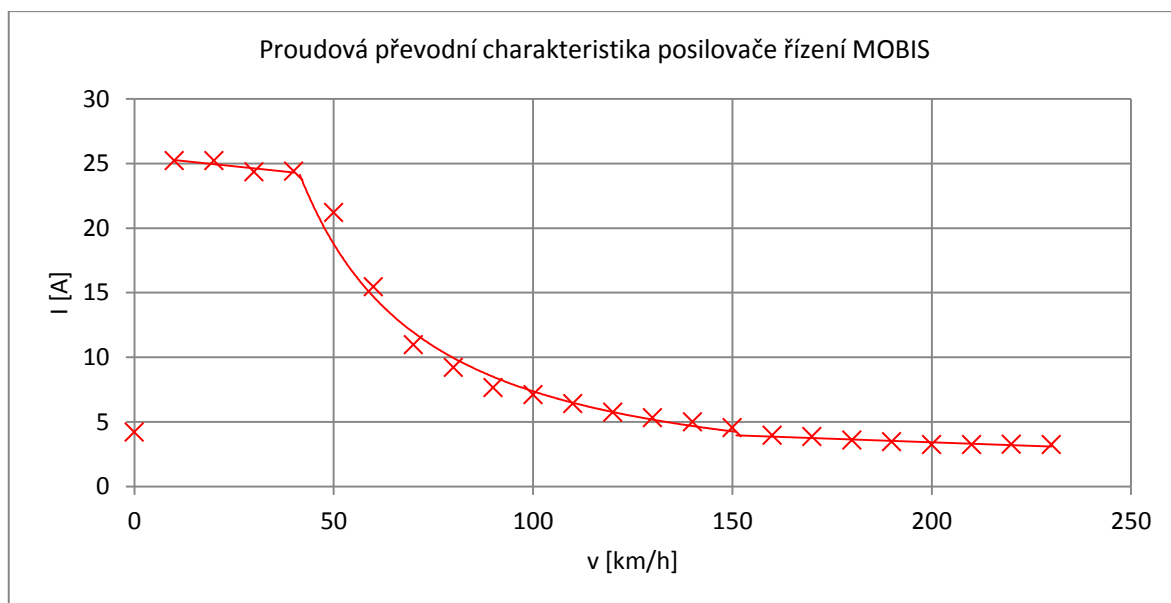


Obrázek 11: Zesílení posilovače řízení MOBIS



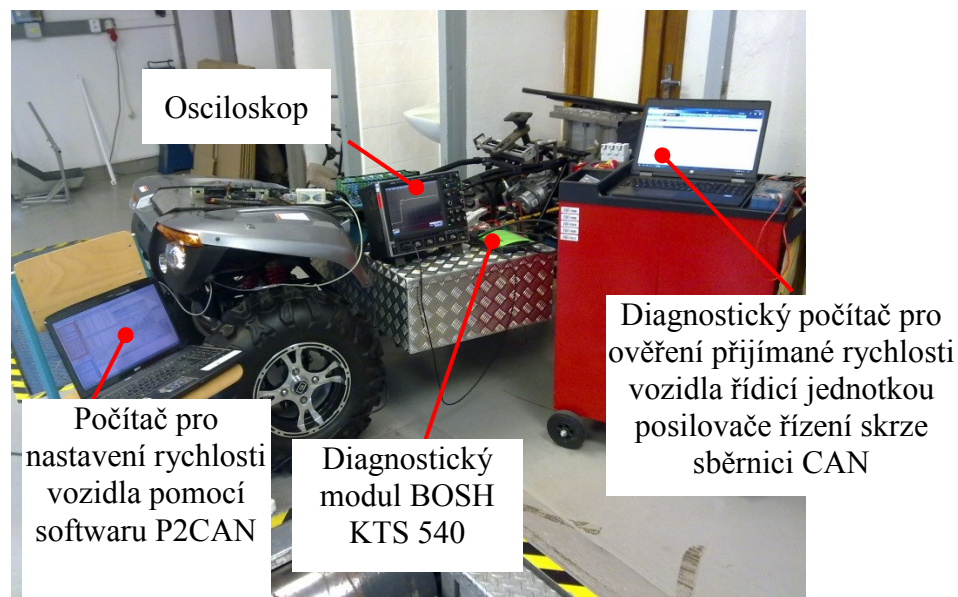
Obrázek 12: Měření silových poměrů v řízení

Pro elektromobil je důležité, jaký mají jednotlivé spotřebiče proudový odběr vzhledem k výdrži napájecích akumulátorů. Spotřebič s neúměrně velkou spotřebou by značně zkracoval dojezd vozidla. Pomocí osciloskopu LeCroy Wawerunner a proudové sondy Agilent 1146A byl změřen proud odebíraný posilovačem řízení při plném zatížení. Zatížení posilovače bylo vyvoláno zablokováním přední nápravy elektromobilu.



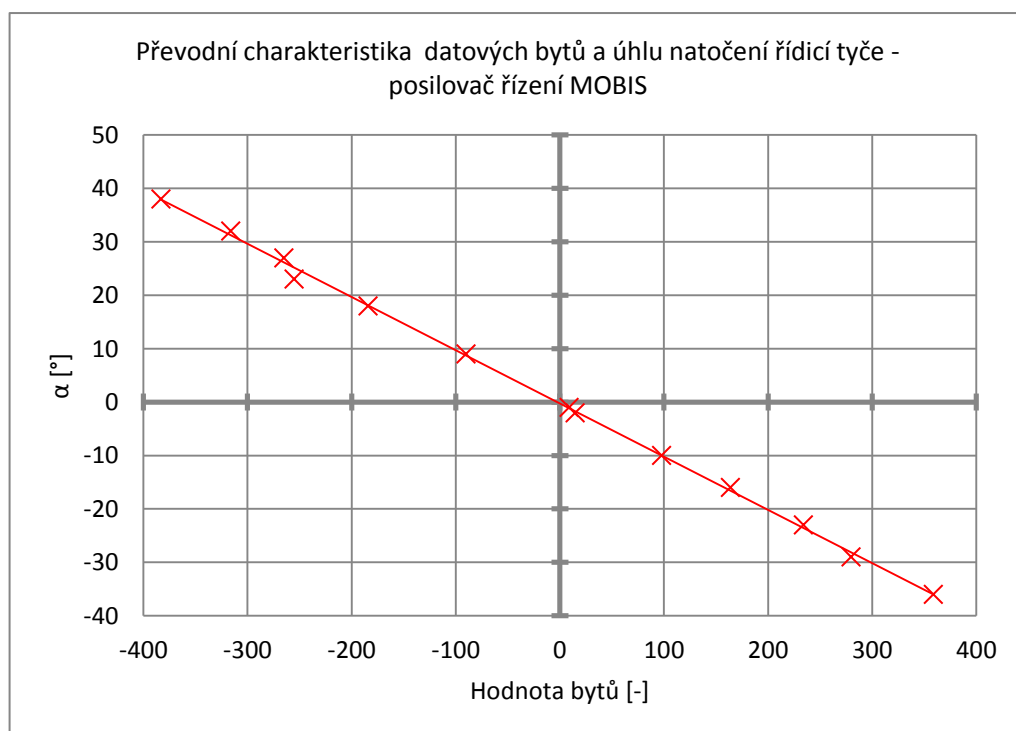
Obrázek 13: Proudová převodní charakteristika posilovače řízení MOBIS

Z obrázku č. 13 je patrné, že proudový odběr v jednotlivých rychlostech vozidla se snižuje a kopíruje tak velikost síly měřené na spojovací tyči řízení (viz obrázek č. 9).



Obrázek 14: Měření proudového odběru posilovače řízení

Pomocí diagnostického modulu Bosh KTS 540 byla rovněž zjištěna převodní charakteristika hodnoty datových bytů a stupňů natočení řídicí tyče elektromobilu Democar. Řídicí tyč byla natáčena v rozsahu lineárního vedení a pomocí CAN analyzátoru byla odečtena hodnota datových bytů vyslaných posilovačem řízení na sběrnici CAN. Skrze diagnostický modul byla následně odečtena příslušná hodnota natočení řídicí tyče v úhlových stupních.



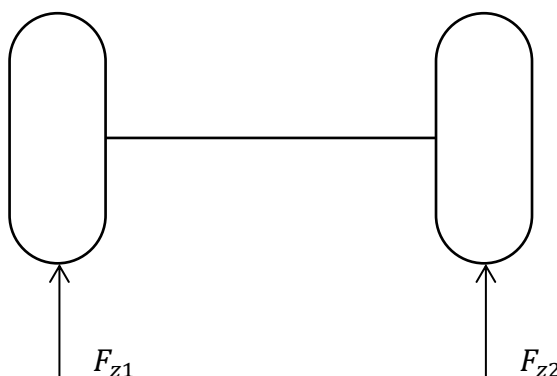
Obrázek 15: Převodní charakteristika datových bytů a natočení řídicí tyče elektromobilu Democar

4 Modifikace požadavků na ovládací krokový motor mechanismu servořízení

Využitím posilovače řízení se zásadně změní silové účinky v mechanismu řízení natáčení přední nápravy elektromobilu Democar. Jak již bylo zmíněno v kapitole 2.2, při navýšení síly v mechanismu řízení přední nápravy, bude možné provozovat stávající krokový motor při vyšší rychlosti.

4.1 Výpočet minimální síly potřebné k natočení kol

Pro výpočet minimální síly, respektive krouticího momentu na sloupku řízení bylo nejprve zjištěno zatížení přední nápravy. Zatížení každého kola bylo změřeno zvlášť.



Obrázek 16: Zatížení jednotlivých kol přední nápravy

Bylo zjištěno, že vlivem nerovnoměrného rozložení zatížení náprav platí:

$$F_{z1} \neq F_{z2} \quad (4)$$

kde: F_{z1} je zatěžovací síla pravého kola po směru jízdy [N],

F_{z2} je zatěžovací síla levého kola po směru jízdy [N].

Jednotlivé zatěžovací síly byly určeny dle vztahů:

$$F_{z1} = m_1 \cdot g \quad (5)$$

$$F_{z2} = m_2 \cdot g \quad (6)$$

kde: m_1 je hmotnost připadající na pravé kolo přední nápravy po směru jízdy [kg],

m_2 je hmotnost připadající na levé kolo přední nápravy po směru jízdy [kg],

g je gravitační zrychlení ($g = 9,82 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$). [12]

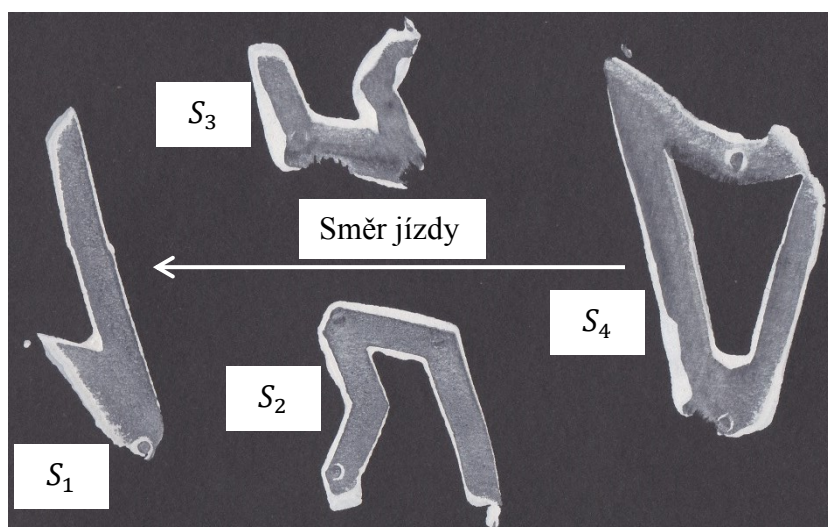
Po dosazení do vztahů č. 5 a 6:

$$F_{z1} = 132,6 \cdot 9,82 = 1302,132 \text{ N}$$

$$F_{z2} = 148,5 \cdot 9,82 = 1458,27 \text{ N}$$

Pro další výpočet bylo využito méně příznivého případu, tedy většího zatížení kola přední nápravy F_{z2} .

Důležitá veličina ovlivňující celkovou sílu potřebnou k natočení kola je plocha dotyku pneumatiky s podložkou. Ta byla zjištěna pomocí experimentu, kdy byla na pneumatiku nanесena barva a následně otisknuta na kontrastní podložku.

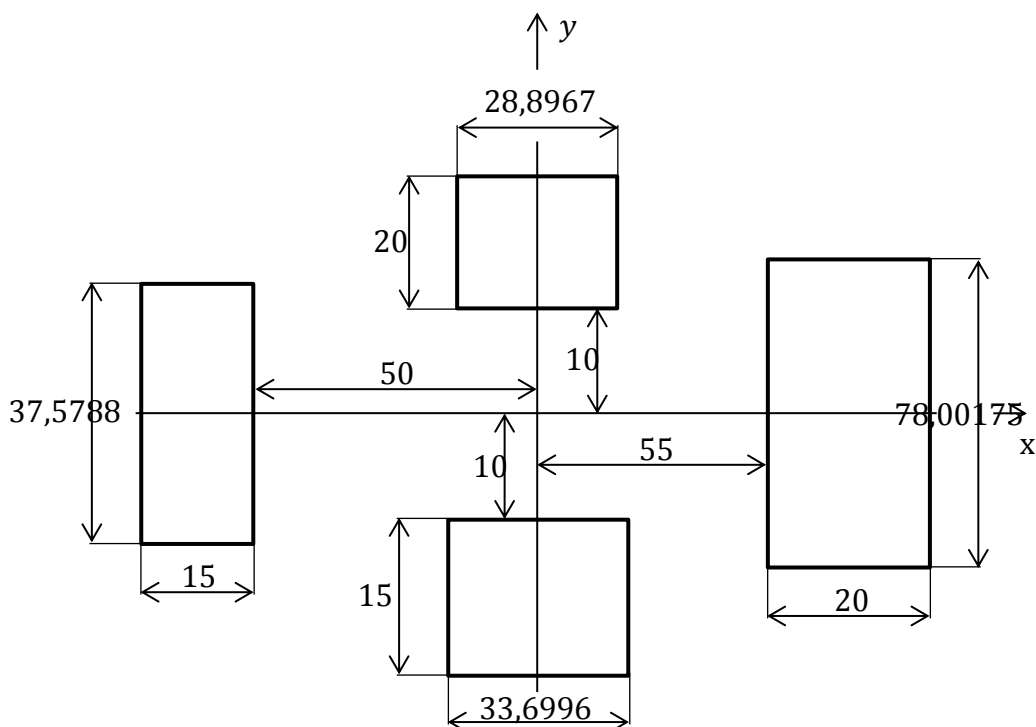


Obrázek 17: Styčná plocha pneumatiky a podložky

Pro výpočet minimálního krouticího momentu potřebného k natočení kola byly poměrně složité styčné plochy z obrázku č. 17 nahrazeny ekvivalentními obdélníkovými plochami o stejném obsahu. Pro výpočet obsahu tvarově složitých ploch z obrázku č. 17 byl využit software Gimp 2.0 s doplňkem Area Count. Obsahy jednotlivých ploch jsou shrnuty v tabulce č. 2.

Tabulka 2: Obsahy styčných ploch pneumatiky a podložky

Plocha	Obsah [mm ²]
S_1	563,682
S_2	577,934
S_3	505,494
S_4	1123,595



Obrázek 18: Ekvivalentní dotykové plochy pneumatiky a podložky

Krouticí moment potřebný k natočení kola byl určen dle vztahů:

$$\mathbf{M} = \mathbf{F} \times \mathbf{r} \quad (7)$$

kde: \mathbf{M} je vektor krouticího momentu [Nm],
 \mathbf{F} je vektor síly vyvolávající krouticí moment [N],
 \mathbf{r} je polohový vektor.

$$F_z = p \cdot S \quad (8)$$

kde: F_z je zatěžovací síla nápravy [N],
 p je tlak na styčnou plochu S vyvolaný zatížením pneumatiky [Pa],
 S je styčná plocha pneumatiky a podložky [m²].

Ze vztahu č. 8 byl určen tlak působící na jednotlivé dotykové plochy. Po dosazení do vztahu č. 8:

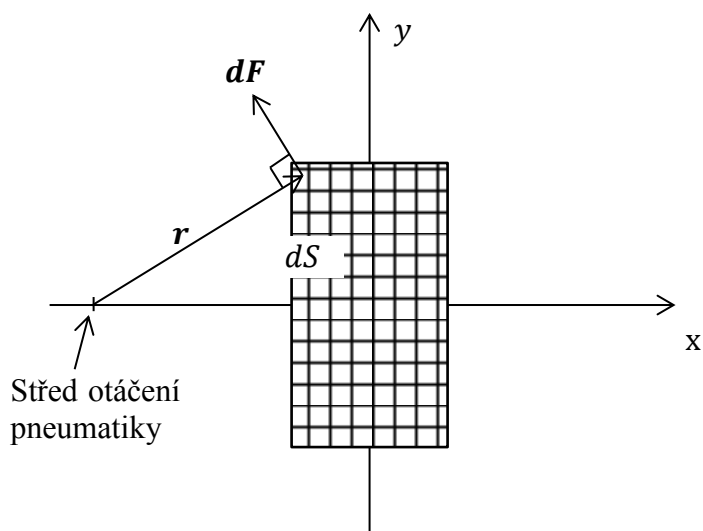
$$p_1 = \frac{F_{z2}}{S_1} = \frac{1458,27}{563,682 \cdot 10^{-6}} = 2,587 \cdot 10^6 \text{ Pa}$$

Výsledky jednotlivých tlaků jsou shrnuty v tabulce č. 3.

Tabulka 3: Tlaky působící na jednotlivé dotykové plochy pneumatiky

Plocha	Tlak [Pa]
S_1	$2,5870 \cdot 10^6$
S_2	$2,5232 \cdot 10^6$
S_3	$2,8848 \cdot 10^6$
S_4	$1,2979 \cdot 10^6$

Jednotlivé dotykové plochy byly rozloženy na malé elementy, u kterých byla předpokládána konstantní tlaková síla. Ta ve skutečnosti konstantní není, ovšem pro zjednodušený výpočet plně postačuje tento model.



Obrázek 19: Rozložení dotykové plochy na elementární plošky

Z obrázku č. 19 je patrné, že platí:

$$dS = dx \cdot dy \quad (9)$$

kde: dS je elementární dotyková ploška [m^2],
 dx je délka hrany elementární dotykové plošky v ose x [m],
 dy je délka hrany elementární plošky v ose y [m]

a dále platí, že:

$$r = \sqrt{x^2 + y^2} \quad (10)$$

kde: r je velikost polohového vektoru elementární dotykové plošky [m],
 x je vzdálenost elementární dotykové plošky od středu otáčení pneumatiky ve směru osy x [m],

y je vzdálenost elementární dotykové plošky od středu otáčení pneumatiky ve směru osy y [m].

Po dosazení do vztahu č. 7, lze vypočítat velikost třecích momentů pro jednotlivé dotykové plochy pneumatiky. Výsledný minimální krouticí moment potřebný pro natočení pneumatiky byl určen dle vztahu:

$$M = \sum_{i=1}^4 M_i \quad (11)$$

kde: M je výsledný třecí moment [Nm],

M_i jsou jednotlivé dílčí momenty, kterými přispívá každá dotyková plocha pneumatiky [Nm].

Po dosazení do vztahu č. 4:

$$\begin{aligned} M_1 &= \int_{x_1}^{x_2} \int_{y_1}^{y_2} p \cdot f \cdot \sqrt{x^2 + y^2} dx dy = 2 \cdot 2,587 \cdot 10^6 \cdot \\ &\quad \cdot 0,55 \int_{50 \cdot 10^{-3}}^{65 \cdot 10^{-3}} \int_0^{18,7894 \cdot 10^{-3}} \sqrt{x^2 + y^2} dx dy = \\ &= 46,9294 \text{ Nm} \end{aligned}$$

Integrační meze byly zvoleny na základě obrázku č. 18. Dosazená hodnota součinitele smykového tření f platí pro styk pneumatiky se suchým asfaltem. [14]

Výsledky jednotlivých třecích momentů jsou shrnuty v tabulce č. 4:

Tabulka 4: Třecí momenty jednotlivých dotykových ploch pneumatiky a podložky

Třecí moment	Velikost [Nm]
M_1	46,9294
M_2	17,8702
M_3	16,0484
M_4	76,5442

Po dosazení do vztahu č. 11:

$$\begin{aligned} M_{\min} &= M_1 + M_2 + M_3 + M_4 = 46,9294 + 17,8702 + 16,0484 + 76,5442 = \\ &= 157,3922 \text{ Nm} \end{aligned}$$

[12]

4.2 Stanovení maximální rychlosti ovládacího krokového motoru mechanismu servořízení

V kapitole 4.1 byl stanoven minimální krouticí moment potřebný k natočení jednoho stojícího kola na přední natáčecí nápravě elektromobilu Democar. Tento krouticí moment byl využit jako vstupní parametr výpočtu maximální možné rychlosti ovládacího krokového motoru.

Pro výpočet byla využita geometrie řízení schematicky naznačená na obrázku č. 10. Potřebná síla ve spojovací tyči řízení byla určena dle vztahu:

$$F_{\text{tyč}} = \frac{M_{\text{min}}}{0,08} \quad (12)$$

kde: $F_{\text{tyč}}$ je síla působící ve spojovací tyči řízení [N],
 M_{min} je minimální požadovaný krouticí moment [Nm],
konstanta 0,08 je délka ramene těhlice vyplývající z geometrie řízení (viz obrázek č. 10).

Po dosazení do vztahu č. 12:

$$F_{\text{tyč}} = \frac{157,3922}{0,08} = 1967,4025 \text{ N}$$

Velikost krouticího momentu na hřídeli řízení za posilovačem řízení byl určen dle vztahu:

$$M_{\text{vyst}} = F_{\text{tyč}} \cdot l \quad (13)$$

kde: M_{vyst} je minimální požadovaný krouticí moment na výstupu posilovače řízení [Nm],
 $F_{\text{tyč}}$ je síla působící ve spojovací tyči řízení [N],
 l je rameno natáčecího mechanismu kol [m] (viz obrázek č. 10).

Po dosazení do vztahu č. 13:

$$M_{\text{vyst}} = 1967,4025 \cdot \sqrt{0,06^2 + 0,02^2} = 111,2931 \text{ Nm}$$

Potřebný krouticí moment na hřídeli řízení před posilovačem řízení byl určen dle vztahu:

$$M_{\text{vst}} = \frac{M_{\text{vyst}}}{Z} \quad (14)$$

kde: M_{vst} je minimální požadovaný krouticí moment na vstupu posilovače řízení [Nm],
 M_{vyst} je minimální požadovaný krouticí moment na výstupu posilovače řízení [Nm],
 Z je maximální zesílení posilovače řízení [-].

Po dosazení do vztahu č. 14:

$$M_{\text{vst}} = \frac{111,2931}{3,5} = 31,7980 \text{ Nm}$$

Minimální požadovaná síla působící ve směru jezdce lineárního vedení byla určena dle vztahu:

$$F_{\text{jez}} = \frac{M_{\text{vst}}}{l_{\text{ovl}}} \quad (15)$$

kde: F_{jez} požadovaná síla působící ve směru jezdce lineárního vedení [N],
 M_{vst} je minimální požadovaný krouticí moment na vstupu posilovače řízení [Nm],
 l_{ovl} je rameno ovládací páky mechanismu servořízení [m].

Po dosazení do vztahu č. 15:

$$F_{\text{jez}} = \frac{31,7980}{0,1} = 317,9800 \text{ N}$$

Protože jsou k mechanismu servořízení připevněny dvě kola, bude potřeba vyvolat na jezdci lineárního vedení dvojnásobnou sílu tedy:

$$F_{\text{jez}} = 317,98 \cdot 2 = 635,9600 \text{ N}$$

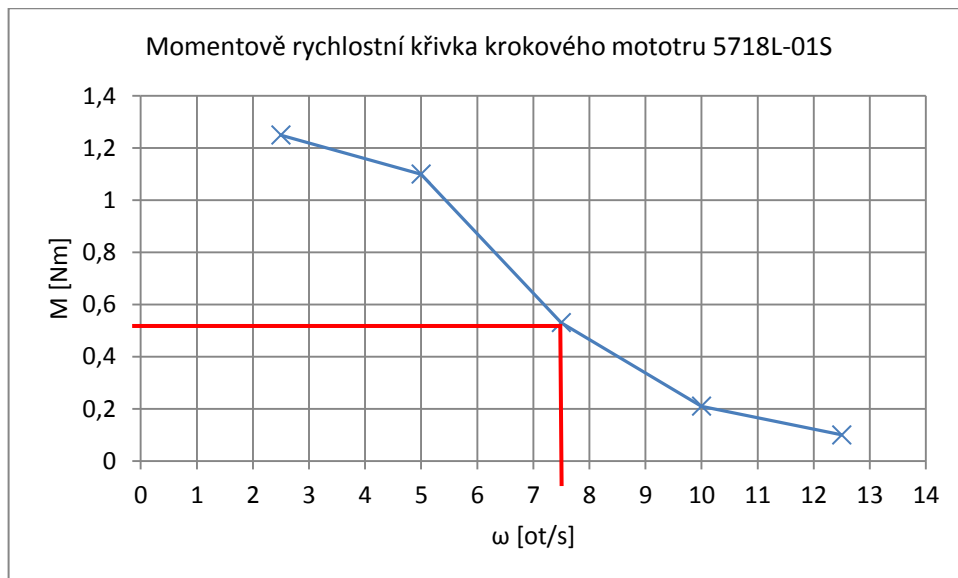
Minimální krouticí moment ovládacího krokového motoru byl určen dle vztahu:

$$M_{\text{km}} = \frac{F_{\text{jez}} \cdot h}{2 \cdot \pi \cdot \eta} \quad (16)$$

kde: M_{km} je minimální požadovaný krouticí moment ovládacího krokového motoru [Nm],
 F_{jez} požadovaná síla působící ve směru jezdce lineárního vedení [N],
 h je stoupání šroubu lineárního vedení [m],
 η účinnost šroubového převodu lineárního vedení (stanovena v lit. [2]).

Po dosazení do vztahu č. 16:

$$M_{\text{km}} = \frac{635,9600 \cdot 0,005}{2 \cdot \pi \cdot 0,9434} = 0,5364 \text{ Nm}$$



Obrázek 20: Momentově rychlostní křivka krokového motoru 5718L-01S [10].

Vypočtený krouticí moment odpovídá dle momentově rychlostní charakteristiky ovládacího krokového motoru maximální možné rychlosti cca 7,5 ot/s.

Praktickou zkouškou při zahrnutí bezpečnosti rychlosti byla stanovena rychlost ovládacího krokového motoru na 130000 kroků za sekundu při využitím mikrokrokování 128 mikrokroků za sekundu. Výsledná využitá rychlost ovládacího krokového motoru byla stanovena dle vztahu:

$$\omega = \frac{n}{n_{\mu s} \cdot 200} \quad (17)$$

kde: ω je rychlost ovládacího krokového motoru [ot/s],

n počet kroků ovládacího krokového motoru za 1 sekundu [-],

$n_{\mu s}$ je počet mikrokroků ovládacího krokového motoru [-],

konstanta 200 určuje počet kroků za jednu otáčku ovládacího krokového motoru při plném krokování ($n_{\mu s} = 1$).

Po dosazení do vztahu č. 17:

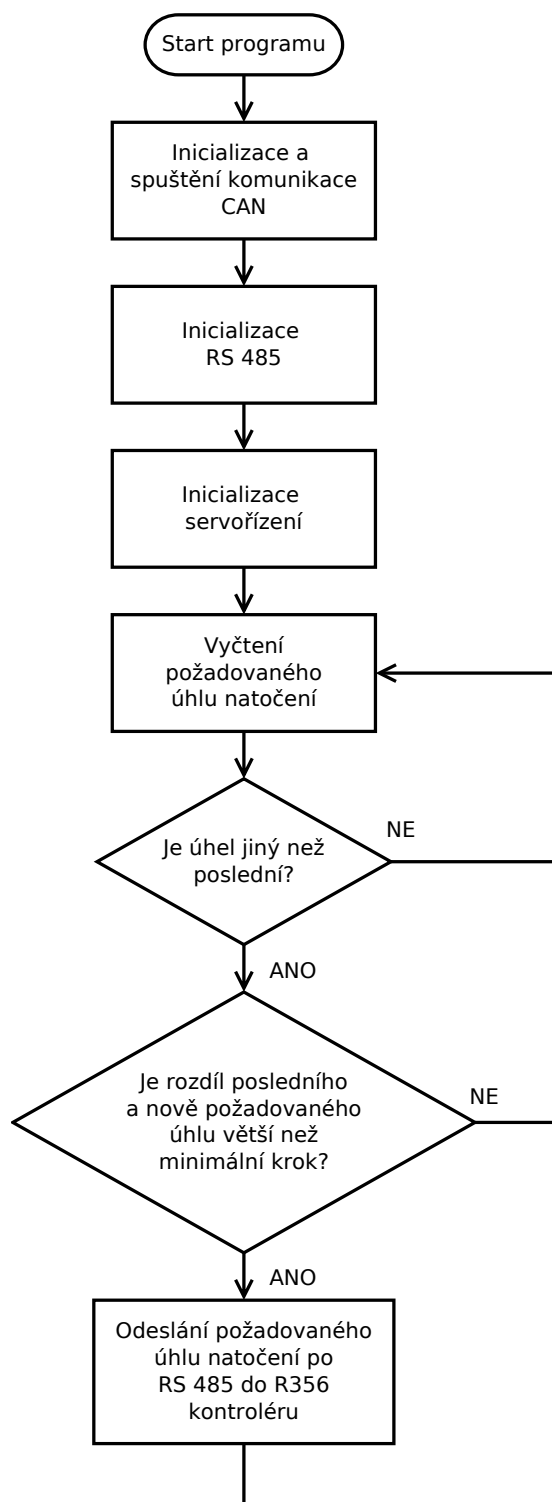
$$\omega = \frac{130000}{128 \cdot 200} = 5,0781 \text{ ot/s}$$

[12]

5 Vývoj software systému servořízení s posilovačem elektromobilu Democar

5.1 Původní řešení software systému servořízení elektromobilu Democar

Praktickým provozem bylo zjištěno, že stávající řešení aplikačního softwaru systému servořízení elektromobilu Democar trpí několika zásadními nedostatky. První z nich je již zmíněná nedostatečná dynamika servořízení. Další nedostatek je způsobený absencí absolutního snímače polohy natočení kol řídící nápravy. Absence tohoto snímače způsobuje, že při každém spuštění elektromobilu je zapotřebí inicializovat středovou polohu natáčecích kol tj. jejich nulové natočení. Inicializace probíhá tak, že kola přední řiditelné nápravy jsou natočena na plný rejď doprava a poté jsou natočena určitým stanoveným počtem kroků ovládacího krokového motoru do středové polohy. Tímto postupem byla inicializována nulová poloha natočení kol pro řídící kontrolér krokového ovládacího motoru R356. Dalším nedostatkem stávajícího algoritmu řízení je absence řízení polohy natočení kol ve zpětnovazební smyčce. Tento fakt způsobuje, že po zadání příkazu natočení kol skrze bezdrátový ovladač není možné požadavek změnit, dokud není původní požadavek vykonán. Velice nekomfortní při ovládání vozidla se ukázala vysoká citlivost páčkového ovladače, který není vybaven hysterezí.



Obrázek 21: Vývojový diagram původního řešení softwaru SCU [3]

5.2 Řídicí jednotka SCU

Řídicí jednotka SCU, která zabezpečuje ovládání natáčecího mechanismu přední nápravy elektromobilu Democar je osazena mikroprocesorem firmy Freescale PPC5643L z řady mikroprocesorů PXS20. Tento mikroprocesor svým výpočetním výkonem plně postačuje pro zadanou aplikaci. Jedná se o 32 bitovou, dvoujádrovou architekturu

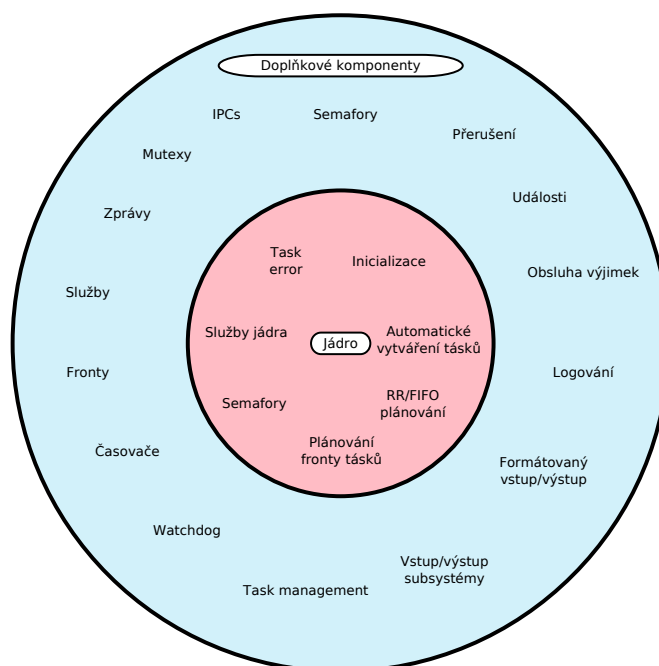
s taktovací frekvencí 120 MHz. Mikroprocesor je vybaven dvojicí FlexCAN komunikačního rozhraní. Dále podporuje komunikaci pomocí UART, LIN, FlexRay. Disponuje 1 MB FLASH pamětí, 128 KB SRAM pamětí. [4] Další parametry mikroprocesoru jsou uvedeny v literatuře č. 4.

Návrhem kompletního zapojení a DPS řídicí jednotky se zabývá literatura č. 2. Protože dřívější návrh obslužného softwaru nevyužíval dvě CAN sběrnice, nebyla DPS řídicí jednotky SCU osazena ukončovacím rezistorem 120 Ω . Z tohoto důvodu bylo nutné desku tímto rezistorem doplnit.

5.3 Operační systém jednotky SCU

Přístup k jednotlivým perifériím mikroprocesoru SCU zajišťuje operační systém MQX. Jedná se o operační systém reálného času. Implementace MQX nabízí řadu knihovných funkcí tzv. komponent, které může obslužný program využívat ke své činnosti. Díky těmto funkcím lze poměrně jednoduše vytvořit tzv. „real time“ aplikaci podporující multitasking. Při vývoji řídicí aplikace není proto nutné nastavovat bity na úrovni jednotlivých registrů, ošetřovat hardwarové přerušení atp.

Samotný operační systém MQX se skládá z komponent jádra a doplňkových komponent, přičemž při překladu programu se do aplikace vloží jen ty komponenty, které jsou využívány operačním systémem MQX nebo volány aplikací. Díky tomuto přístupu se značně minimalizuje velikost výsledné aplikace. [5]

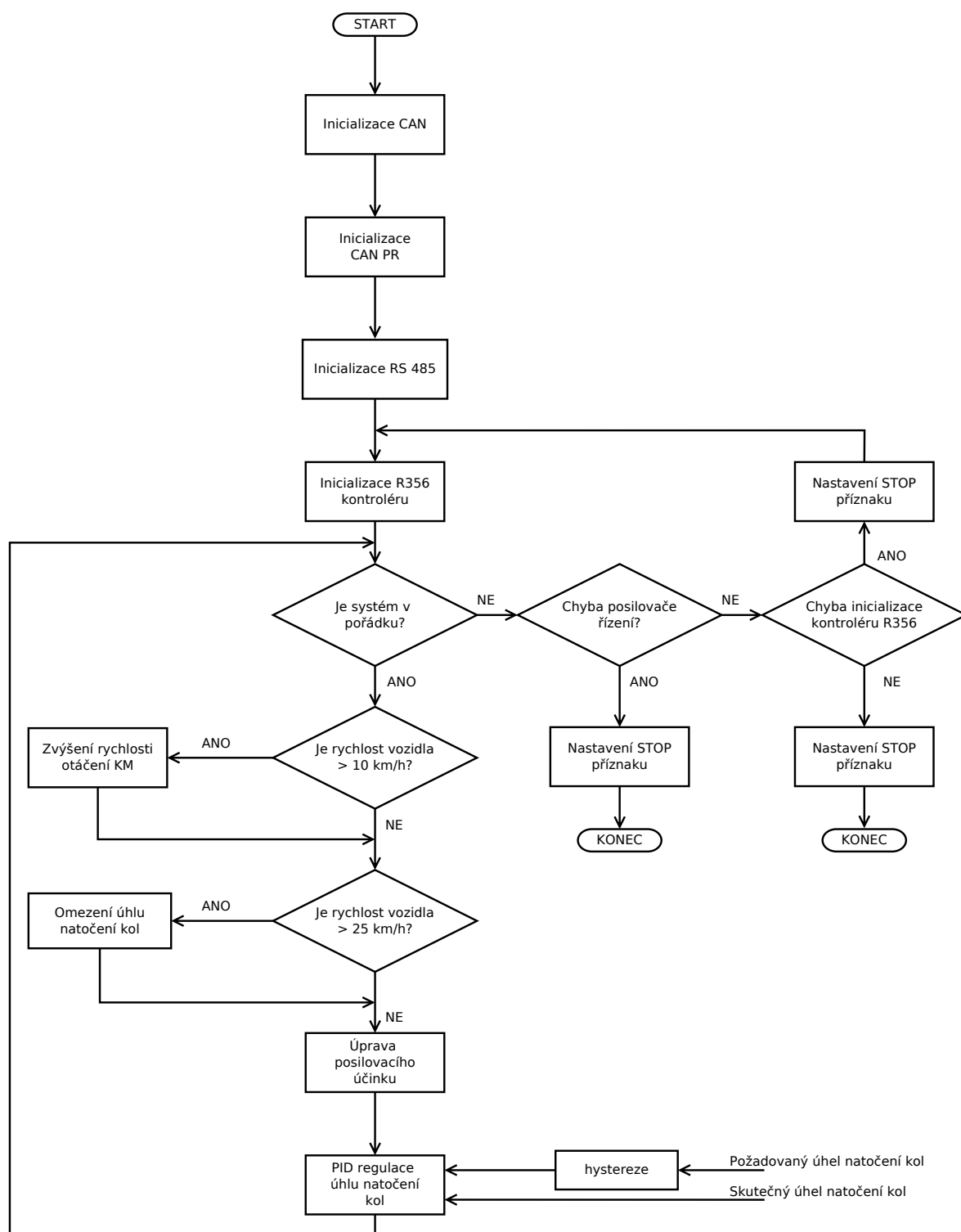


Obrázek 22: Struktura operačního systému MXQ

5.4 Návrh software systému servořízení s posilovačem elektromobilu Democar

Na obrázku č. 23 je uveden vývojový diagram celkové koncepce navrhnutého software pro řídicí jednotku SCU. Navrhnutý software se skládá ze sedmi tasků¹ (vláken), které zajišťují funkcionality systému. Pro jednotlivé CAN sběrnice byly implementovány vždy dva tasky, kdy jeden zajišťuje odesílání datových rámců na sběrnici (Tx task) a druhý příjem datových rámců ostatních řídicích jednotek připojených do struktury sběrnice (Rx task). Hlavní task aplikace zajišťuje regulaci polohy natáčecího mechanismu servořízení. Další task slouží pro zpožděné zapínání směrovek, při dosažení nastaveného úhlu natočení kol. Poslední task pak plní bezpečnostní funkci. Funkční bezpečnosti bude věnována vlastní kapitola. Tyto tasky jsou přepínány vnitřním mechanismem operačního systému MQX a je jim na určitý předem definovaný čas přidělen výpočetní čas procesoru. Navenek tak jednotlivé tasky působí, že jsou zpracovávány paralelně.

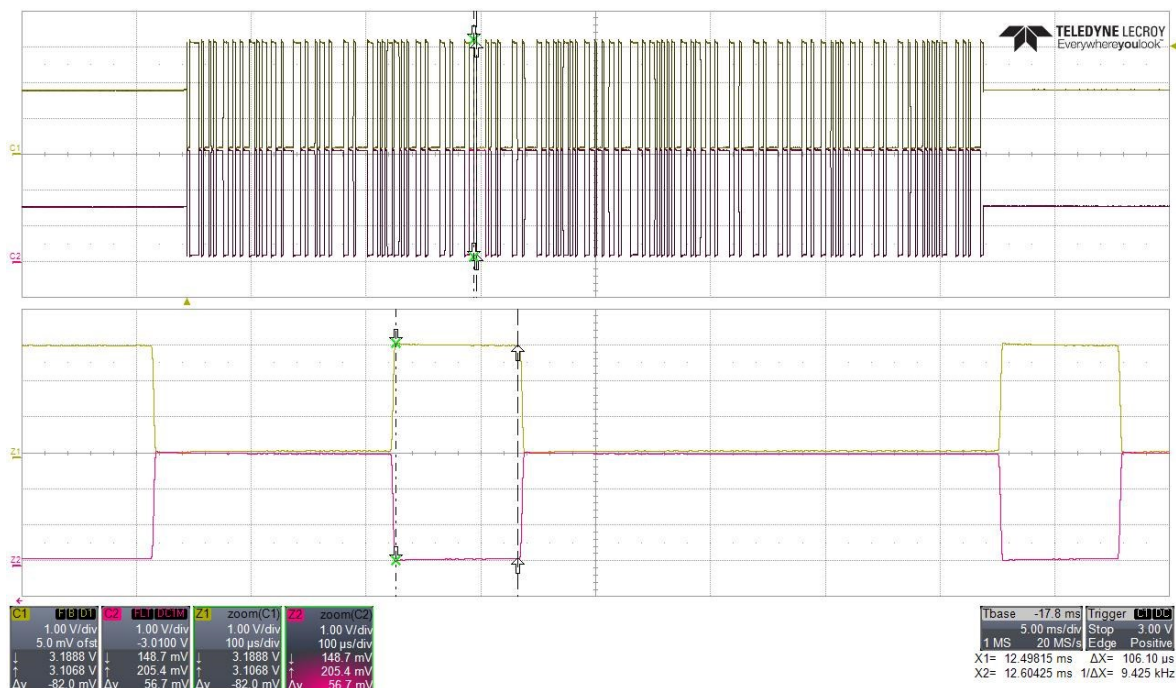
¹ Task – odlehčený proces, samostatně vykonávaná část aplikace, přičemž jednotlivá vlákna sdílí svůj paměťový prostor. Každé vlákno má přiděleno svou prioritu a datové struktury umožňující uložit kontext výpočtu. [15]



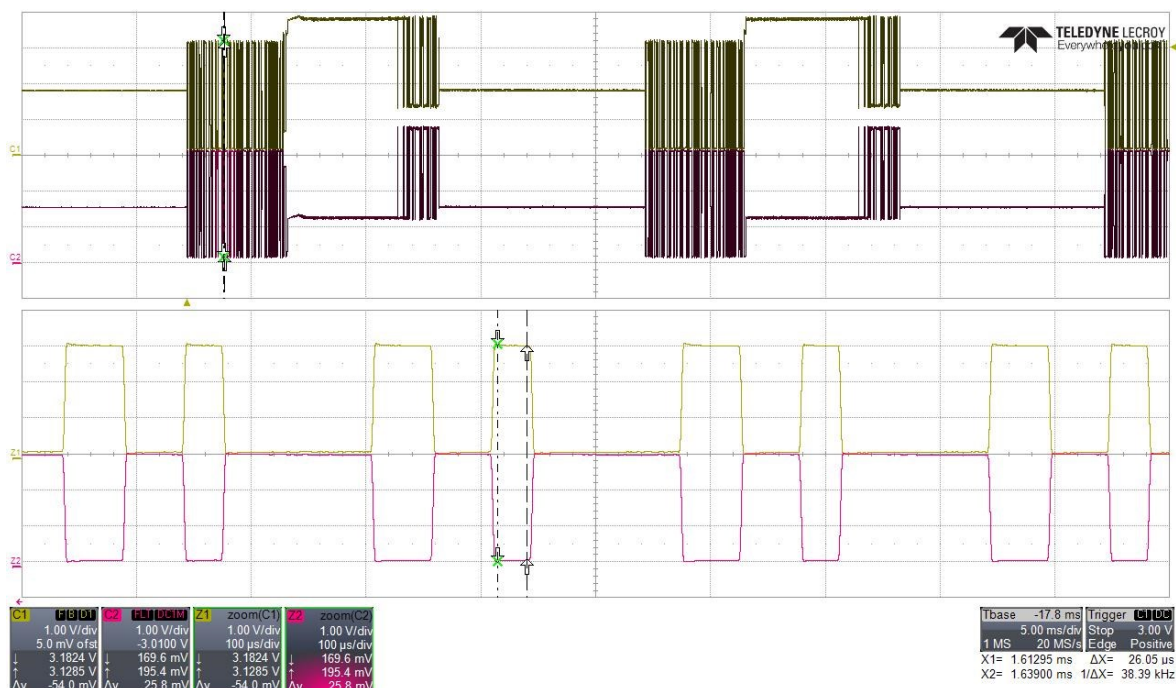
Obrázek 23: Vývojový diagram software systému servořízení s posilovačem elektromobilu Democar

Posloupnost vykonávání nově navrženého software je patrná z obrázku č. 23. Neprodleně po zapnutí vozidla Democar dojde nejprve k inicializaci jednotlivých komunikačních sběrnic: globální CAN (1 Mbit/s), CAN PR pro posilovač řízení (500 kbit/s). Sběrnice RS485 je nejprve inicializována na rychlost 9600 b/s, neboť tato rychlost je továrně nastavena v kontroléru R356. Poté co je kontroléru R356 odeslána inicializační

zpráva, která obsahuje nastavení mikrokrokování, rychlosti, zrychlení, velikosti rozběhového a přídržného proudu krokového motoru a rychlosti komunikace, je rychlost sběrnice nastavena na 38400 b/s. [11] Veškeré zprávy, které je kontrolér R356 schopen zpracovávat jsou uvedeny v literatuře č. 11.

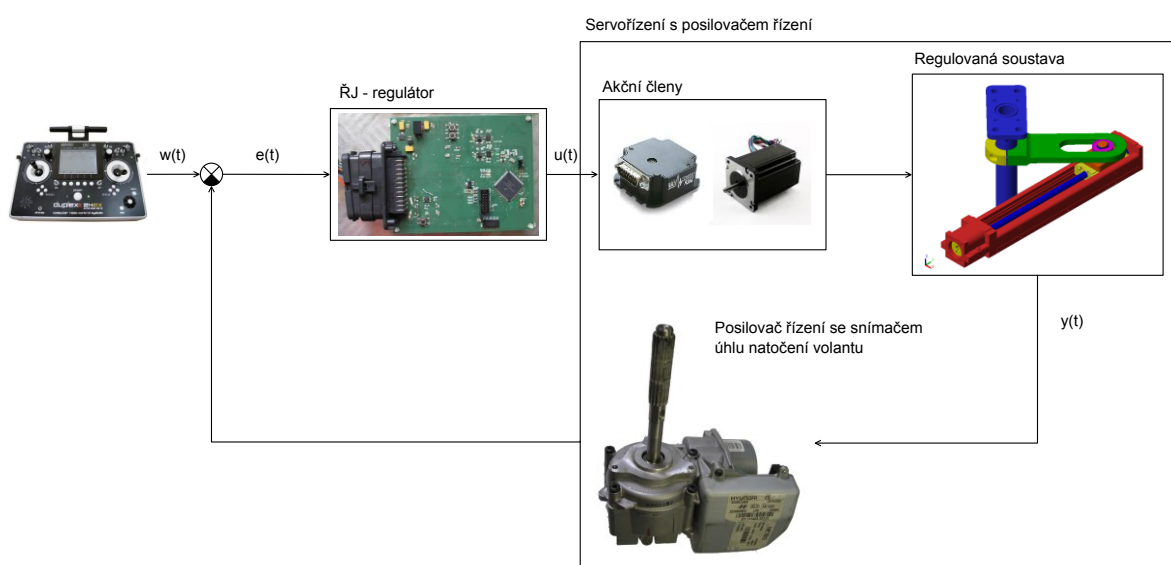


Obrázek 24: Inicializační zpráva pro kontrolér R356 - rychlost 9600 b/s



Obrázek 25: Komunikace kontroléru R356 skrze sběrnici RS485 - rychlost 38400 b/s

Regulace polohy natáčecího mechanismu je prováděna pomocí PID regulátoru, jenž byl seřízen experimentálně. Regulátor polohy servomechanismu byl využit zejména proto, aby bylo možné změnit směr pohybu natočení kol vozidla ještě před dokončením předchozího příkazu. Funkci regulátoru zde vykonává řídicí jednotka SCU. Regulovanou soustavou je pak natáčecí mechanismus kol. Zpětná vazba je realizována skrze posilovač řízení, jež udává informaci o aktuálním natočení kol vozidla. Zároveň se tímto přístupem odstranil problém ztráty informace o poloze mechanismu, kdy byla poloha získávána skrze zabudovaný encoder v krokovém motoru. Při přetížení a protočení krokového motoru došlo díky absenci snímače absolutní polohy ke ztrátě informace o aktuální poloze servomechanismu. Princip regulace je zjednodušeně uveden na obrázku č. 26.



Obrázek 26: Implementovaný regulační obvod systému servořízení s elektronickým posilovačem řízení

Blok hystereze na vstupu regulátoru způsobuje necitlivost na velice malé pohyby ovládacího pákového ovladače směru jízdy. V praxi se ukázalo, že přílišná citlivost tohoto ovládacího prvku je při ovládání vozidla nekomfortní.

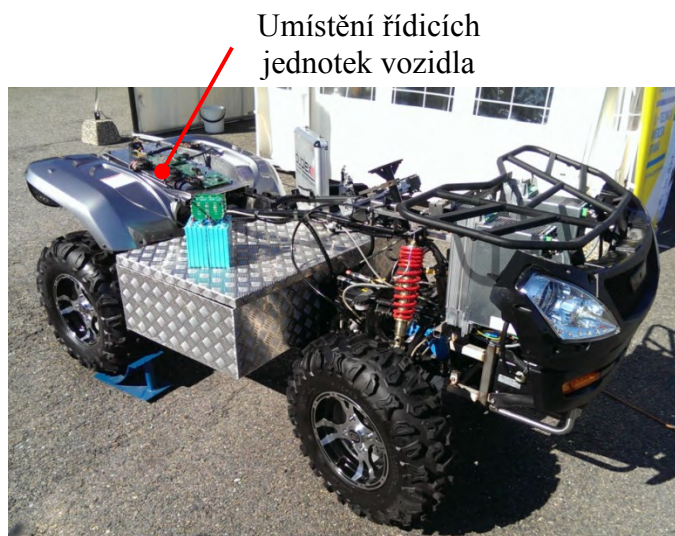
Aby bylo možné ovládat posilovací účinek elektronického posilovače řízení, byla implementována funkce, která na základě experimentálně zjištěných prahových hodnot rychlosti elektromobilu Democar, nastaví vstupní konstantu pro posilovač řízení, jež je vyslána skrze sběrnici CAN PR. Tento parametr zpracovává ŘJ posilovače řízení a odpovídajícím způsobem nastaví posilovací účinek. Jako tato vstupní konstanta slouží rychlostní parametr převodní charakteristiky (viz obrázek č. 9).

Další funkcí, která byla implementována, je funkce zvyšující rychlost otáčení ovládacího krokového motoru, pokud je vozidlo uvedeno do pohybu a překročí rychlost 10 km/h. Při pohybu vozidla již není zapotřebí tak velkého krouticího momentu pro natočení kol vozidla a je proto možné zvýšit rychlost ovládacího krokového motoru a tím i dynamiku celého systému.

5.5 Funkční bezpečnost systému

Jak již bylo zmíněno v úvodu této práce, je systém servořízení jeden z nejdůležitějších systémů vozidla. Na jeho funkčnosti závisí bezpečnost osob pohybujících se v okolí vozidla a majetku, jež by mohl být v případě havárie vozidla poškozen. Je proto bezpodmínečně nutné zajistit jeho funkčnost během pohybu vozidla.

Pro část hardwaru představuje nejzávažnější riziko působení mechanických a chemických veličin. Celý systém je při provozu vozidla vystaven neustálým otřesům vznikajícím při pohybu vozidla po nerovnostech. Vzniklé rázy jsou nejkritičtější zejména pro řídicí jednotku systému, jež je vybavena elektronickými součástkami. Tento jev je částečně potlačen pružným zabudováním řídicích jednotek do šasi vozidla. Chemické veličiny, které mohou na systém za jeho provozu působit, jsou provozní kapaliny vozidla při jejich případném úniku a zejména vzdušná vlhkost a voda při případném provozu vozidla za deště. Proti působení chemických veličin na řídicí jednotky jednotlivých systémů je po provedení celkového vývoje systémů počítáno se zabudováním řídicích jednotek do speciálních krytů využívaných v oblasti automotive. Současně jsou řídicí jednotky umístěny na co možná nejbezpečnější vyvýšené místo elektromobilu Democar.



Obrázek 27: Umístění řídicích jednotek elektromobilu Democar [7]

Při provozu elektromobilu je pro všechny jeho elektronické systémy nezbytně důležité napájení elektrickou energií. Během dlouhého provozu elektromobilu může dodávka elektrické energie poklesnout pod určitou kritickou mez. Pro tyto stavy je vozidlo vybaveno jednotkou EMCU, která tyto stavy monitoruje a případně oznámí ostatním ŘJ vozidla, že dochází k podbýjení některého z napěťových článků.

Za provozu může také dojít ke skokové ztrátě napájecího napětí. Tyto stavy mohou nastat za určitých specifických podmínek a to při:

- nehodě vozidla,
- poškození vodičů vlivem vibrací,
- zkratu,
- při zatečení např. dešťové vody do elektronických systémů.

Pokud dojde k výpadku větve napájecího napětí 12 V, která napájí řídicí jednotky, přestane systém pracovat a nebude schopen jakékoliv reakce na požadavky zadávané řidičem. Pokud nastane výpadek větve napájecího napětí 12 V, která napájí elektronický posilovač řízení, dojde k náhlému omezení krouticího momentu dodávaného na páku rejdového čepu. Tento stav způsobí zastavení systému v takové poloze, kdy již nebude krouticí moment dodávaný pouze ovládacím krokovým motorem stačit k dalšímu natočení kol vozidla. Pokud by došlo k opětovnému dodání elektrické energie do posilovače řízení, nebude inicializována nulová poloha snímače úhlu natočení kol a systém rovněž nebude schopen provozu, neboť ztratí zpětnovazební informaci o aktuální poloze úhlu natočení kol. Informace o aktuálním úhlu natočení kol přední nápravy je rovněž důležitá pro řídicí jednotku pohonu. Na základě této informace DCU provádí výpočty nutné k činnosti elektronických diferenciálů, kterými je vozidlo vybaveno. Při výpadku větve napájecího napětí 24 V, dojde k nečinnosti kontroléru R356. Bez tohoto kontroléru nemůže ovládací krokový motor vykonávat žádný pohyb a celý systém by opět zůstal bez odezvy na jakýkoliv požadavek zadaný řidičem.

Pro minimalizaci těchto stavů, je zapotřebí zajistit dostatečnou ochranu citlivých elektronických ŘJ vozidla. Důležitým faktorem je také pečlivost provedení elektrických spojů. Z hlediska bezpečnosti se doporučuje využívat krimpovaných spojů. U vodičů menších průřezů jsou takto provedené spoje stejně únosné jako samotný vodič. [9]

Všechny výše popsané problémy představují vážné bezpečnostní riziko, proto je bezpodmínečně nutné s těmito stavy při vývoji software pro SCU počítat. Z tohoto důvodu

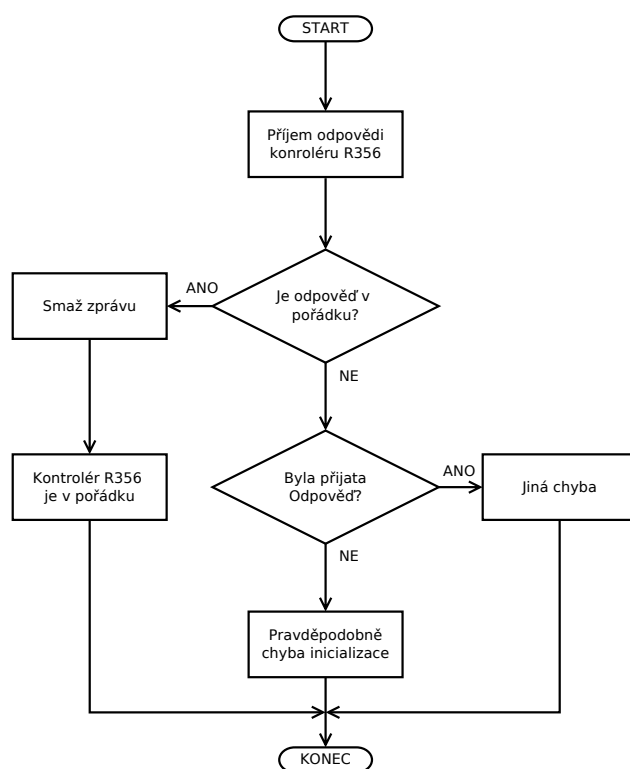
bylo navrženo a implementováno několik bezpečnostních funkcí snižujících riziko havárie vozidla. Jednou z těchto funkcí je funkce kontrolující stav systému servořízení. Tato funkce byla pro svou rozsáhlost ještě dále dekomponována na další dvě dílčí funkce. Jedna kontroluje stav kontroléru R356 (viz obrázek č. 28) a druhá stav elektronického posilovače řízení (viz obrázek č. 29).

Pro implementaci kontroly stavu kontroléru R356 bylo důležité, že kontrolér vrací skrze sběrnici RS 485 odpověď na každý přijatý příkaz. Tato odpověď je vrácena za 5 ms od obdržení příkazu. Příjem těchto zpráv skrze sběrnici R485 je realizován pomocí samostatného tasku, neboť pokud by kontrolér skrze sběrnici neodpověděl, došlo by k zablokování celého obslužného programu a ten by nebyl schopen na tento stav adekvátně zareagovat. Funkce kontroly posilovače řízení rovněž využívá skutečnosti, že elektronický posilovač řízení posílá skrze svůj datový rámec s ID 688 na sběrnici CAN PR informaci o svém stavu, zda byl inicializován či nikoliv.

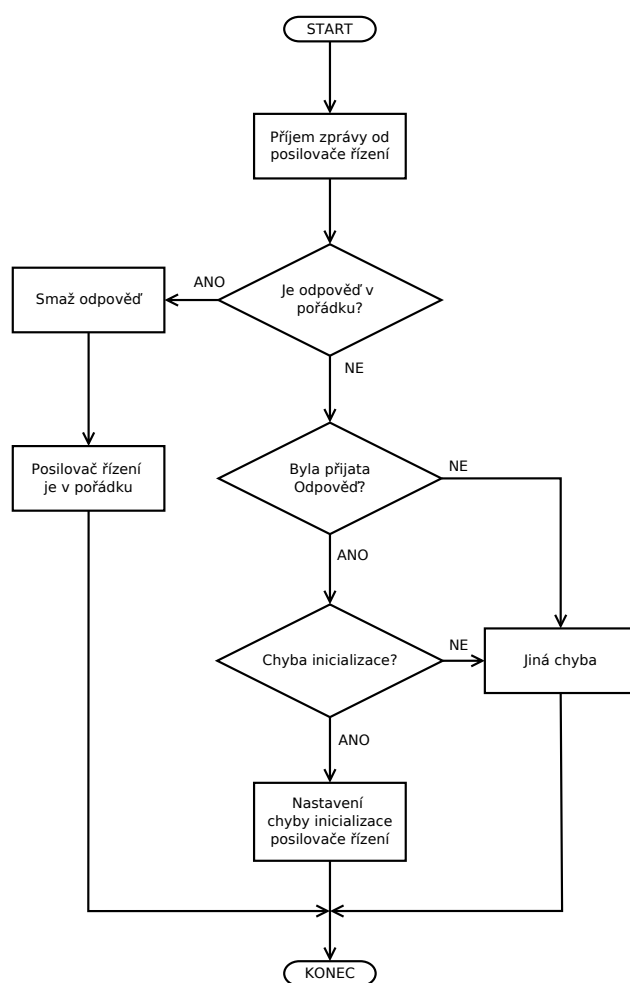
Výsledky dílčích funkcí pro kontrolu jednotlivých komponent systému servořízení jsou vráceny funkci pro kontrolu celého systému, která výsledky vyhodnocuje. Pokud je zaznamenán problém s kontrolérem R356 nebo s elektronickým posilovačem řízení, je okamžitě vyslána na globální sběrnici CAN informace vyžadující neprodlené zastavení vozidla. Tuto informaci zpracovávají jednotky DCU a BCU, které zastavení vozidla zajistí. Zároveň pokud je detekována možná chyba inicializace kontroléru R356, je na komunikační sběrnici RS485 vyslána opětovná inicializace. Pokud je tento pokus o opětovnou inicializaci úspěšný a není zaznamenána další chyba, může být vozidlo opět uvedeno do pohybu. Tento způsob vyhodnocení chyb může být nadále využit pro implementaci vnitřní diagnostiky vozidla. Stav systému je uložen ve vnitřní proměnné *status* navrženého software pro SCU. Jednotlivé stavy jsou shrnuty v tabulce č. 5.

Tabulka 5: Stavy systému servořízení s posilovačem řízení elektromobilu Democar

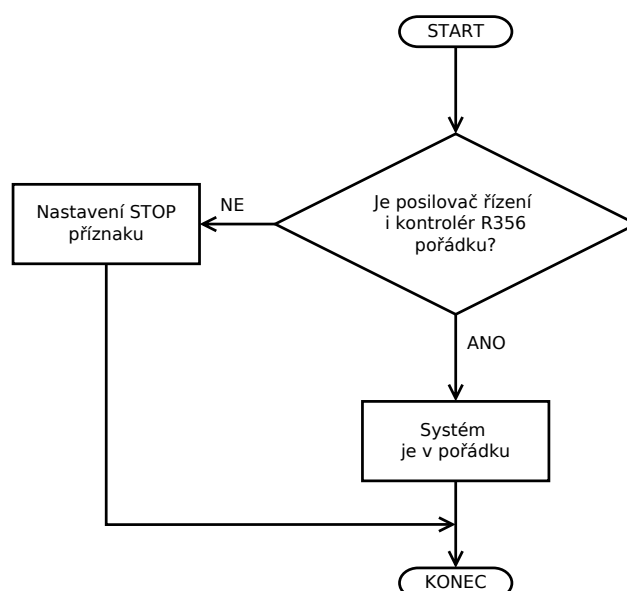
Hodnota proměnné <i>status</i>	Význam
2	Chyba inicializace kontroléru R356
12	Chyba kontroléru R356
20	Chyba posilovače řízení
25	Chyba inicializace nulové polohy posilovače řízení
30	Chyba celého systému (posilovače řízení, kontroléru R356)
40	Systém je v pořádku



Obrázek 28: Vývojový diagram funkce kontroly kontroléru R356



Obrázek 29: Vývojový diagram funkce kontroly posilovače řízení



Obrázek 30: Vývojový diagram funkce kontrolující stav systému

Velice důležitým blokem vývojových diagramů uvedených na obrázku č. 28 a obrázku č. 29 je blok smazání odpovědi ihned po její kontrole. Kdyby nedošlo příslušnou funkcí ke smazání odpovědi, byla by odpověď stále zapsána v paměti programu. V případě, že by došlo k selhání některé komponenty (kontroléru R356, posilovače řízení) systému a odpověď nebyla na sběrnici poslána, software by nebyl schopen tuto fatální chybu detekovat.

Další funkcí zajišťující bezpečnost provozu automobilu je funkce omezující maximální úhel natočení servomechanismu při rychlosti blížící se maximální rychlosti vozidla. Tímto se předchází situacím, kdy by došlo při příliš velkém natočení kol k hrozbě převrácení vozidla.

5.6 Spolupráce jednotky SCU s ostatními řídicími jednotkami elektromobilu Democar

K bezpečnému provozu vozidla Democar je zapotřebí zajistit vzájemnou interakci jednotlivých řídicích systémů. Jednotlivé řídicí jednotky vyžadují pro své řídicí algoritmy vstupní informace, které mohou být snímány a následně sdíleny jiným systémem. Pro sdílení informací využívají jednotlivé řídicí jednotky automobilovou sběrnici CAN. Komunikace je realizována rychlostí 1 Mbit/s.

Jednotka SCU při své činnosti spolupracuje s jednotkami CCU, DCU, BCU a LCU. Z jednotky CCU přijímá datové rámce s identifikátorem 100. Z tohoto datového rámce

zpracovává informaci o aktuální poloze páčkového ovladače směru jízdy, která je obsažena v datovém bytu č. 0 a č. 1.

Z jednotky DCU přijímá datové rámce s identifikátorem 150. S tímto identifikátorem posílá jednotka DCU dva druhy zpráv. Zpráva, jež obsahuje informaci o rychlosti vozidla, má hodnotu datového bytu č. 0 rovnu 123. Z tohoto datového rámce je zpracována informace o rychlosti vozidla, která je obsažena v datových bytech č. 6 a č. 7. [13] Rychlost vozidla je dále zpracovávána jako absolutní hodnota, neboť není zapotřebí rozlišovat směr pohybu vozidla.

Tabulka 6: CAN zprávy přijímané jednotkou SCU

Jednotka	ID	Byte	Hodnota	Význam
CCU	100	0	0 až 255	Úhel natočení páčkového ovladače
		1	0 až 255	
DCU	150	0	123	Příznak zprávy obsahující rychlost vozidla
		6	0 až 255	Rychlost vozidla
		7	0 až 255	

Zároveň na společnou sběrnici CAN periodicky vysílá datové rámce se svým přiděleným identifikátorem 780. Tyto datové rámce obsahují úhel natočení servomechanismu, příznak o funkčnosti systému servořízení a příznaky aktivující jednotlivá směrová světla.

Tabulka 7: Význam datových bytů datového rámce jednotky SCU

Byte	Hodnota	Význam
0	0 až 255	Úhel natočení kol řídící nápravy
1	0 až 255	
2	-	-
3	0 / 120	Systém je v pořádku / chyba systému
4	0 / 1	Vypni/zapni levou směrovku
5	0 / 1	Vypni/zapni pravou směrovku
6	-	-
7	-	-

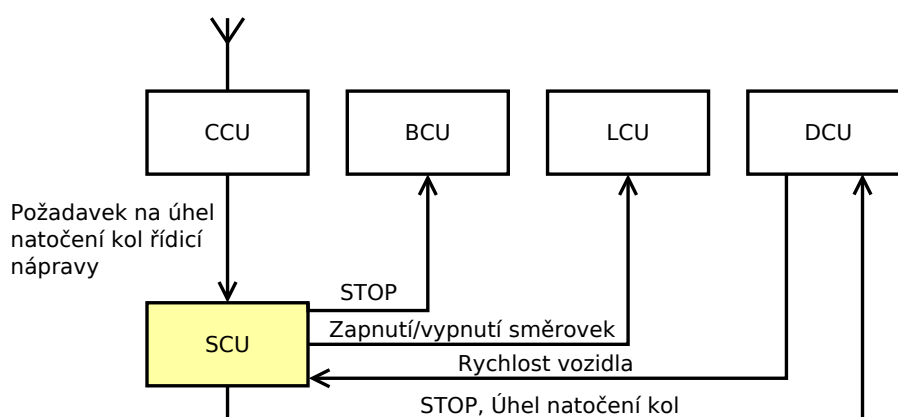
Hodnota datového bytu č. 0 se při pohybu servomechanismu doleva mění v rozsahu 0 až 255, po dosažení maximální hodnoty dojde k inkrementaci datového bytu č. 1. Pokud se servomechanismus pohybuje doprava, dojde k dekrementaci datového bytu č. 1 z hodnoty 255. Takto je rozlišen směr pohybu servomechanismu.

Informaci o úhlu natočení využívá ke své činnosti jednotka DCU. Na základě této informace pak realizuje algoritmus elektronického diferenciálu. Rovněž na základě této

informace omezuje maximální rychlost vozidla, aby nedošlo k jeho překlopení při velkém úhlu natočení kol řídicí nápravy vozidla.

Nejdůležitější informací vysílanou na sběrnici je informace o stavu systému. Jakmile je indikována závada systému, je na sběrnici okamžitě vyslána stavová informace, kterou zpracovává jak jednotka DCU, která zastaví tok krouticího momentu ke kolům vozidla, tak jednotka BCU která zahájí nouzové brzdění.

Poslední informací vysílanou jednotkou SCU je příznak zapnutí směrových světel. Tento příznak je vysílán vždy, když dojde k překročení úhlu natočení kol 25° na dobu delší než 2 sekundy. Tato informace je pak zpracována jednotkou LCU.



Obrázek 31: Schéma komunikace jednotlivých ŘJ

6 Ověření funkčnosti systému

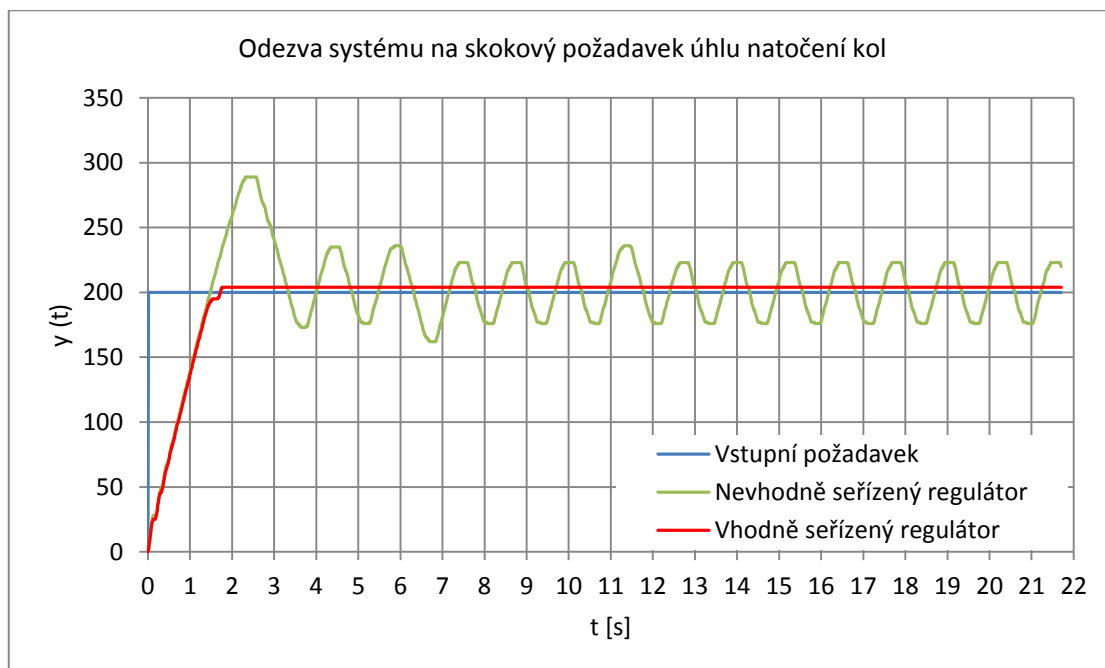
Funkčnost navrženého algoritmu obslužného softwaru byla otestována pomocí vývojového prostředí CodeWarrior, jež umožňuje v tzv. debug módu sledovat hodnoty vnitřních proměnných navrženého programu. Zároveň byla pomocí CAN emulátoru a softwaru PP2CAN sledována a zaznamenána komunikace probíhající na jednotlivých CAN sběrnicích elektromobilu Democar.

Identifikátor Informace o úhlu natočení kol Příznak stavu systému (0 – v pořádku, 120 - chyba) Příznak levé směrovky Příznak pravé směrovky

Nu...	T	Received time	Type	Id 1	Id 2	Bytes	B0	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	Value
110	L	12:56:55.92...	St	780		8	112	1	0	0	1	0	0	0	112
109	L	12:56:55.68...	St	780		8	112	1	0	0	1	0	0	0	112
108	L	12:56:55.44...	St	780		8	112	1	0	0	1	0	0	0	112
107	L	12:56:55.20...	St	780		8	112	1	0	0	1	0	0	0	112
106	L	12:56:54.96...	St	780		8	112	1	0	0	1	0	0	0	112
105	L	12:56:54.72...	St	780		8	112	1	0	0	1	0	0	0	112
104	L	12:56:54.48...	St	780		8	112	1	0	0	1	0	0	0	112
103	L	12:56:54.24...	St	780		8	112	1	0	0	1	0	0	0	112
102	L	12:56:54.1...	St	780		8	112	1	0	0	1	0	0	0	112
101	L	12:56:53.76...	St	780		8	112	1	0	0	0	0	0	0	112
100	L	12:56:53.52...	St	780		8	112	1	0	0	0	0	0	0	112
99	L	12:56:53.28...	St	780		8	112	1	0	0	0	0	0	0	112
98	L	12:56:53.42...	St	780		8	112	1	0	0	0	0	0	0	112
97	L	12:56:52.80...	St	780		8	112	1	0	0	0	0	0	0	112
96	L	12:56:52.56...	St	780		8	112	1	0	0	0	0	0	0	112
95	L	12:56:52.32...	St	780		8	112	1	0	0	0	0	0	0	112

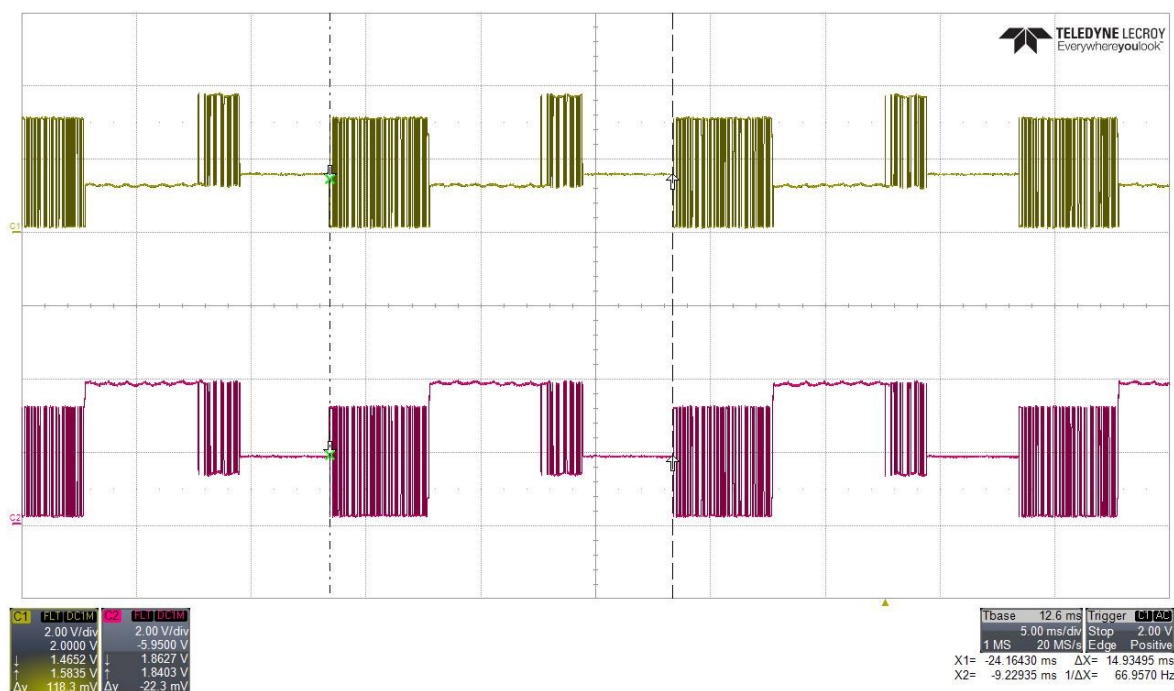
Obrázek 32: Datový rámec vysílaný jednotkou SCU na sběrnici CAN

Pomocí záznamu CAN komunikace mezi elektronickým posilovačem a ŘJ SCU byla zaznamenána odezva systému na skokovou změnu požadavku úhlu natočení kol přední nápravy. Záznam byl proveden s různým nastavením parametrů regulátoru. Nejprve byly hodnoty PID složek regulátoru nastaveny na tyto hodnoty: $P = 10$; $I = 1$; $D = 1e^{-9}$. Takto nastavený regulátor vykazoval známky velkého počátečního překmitu a následně docházelo k relativně velkému kmitání soustavy kolem žádané polohy. Poté byly parametry regulátoru upraveny na hodnoty: $P = 0,09$; $I = 0,00019$; $D = 1e^{-6}$. Při takovémto nastavení regulátoru dochází jen k minimálnímu překmitu a odezva soustavy je ustálená.



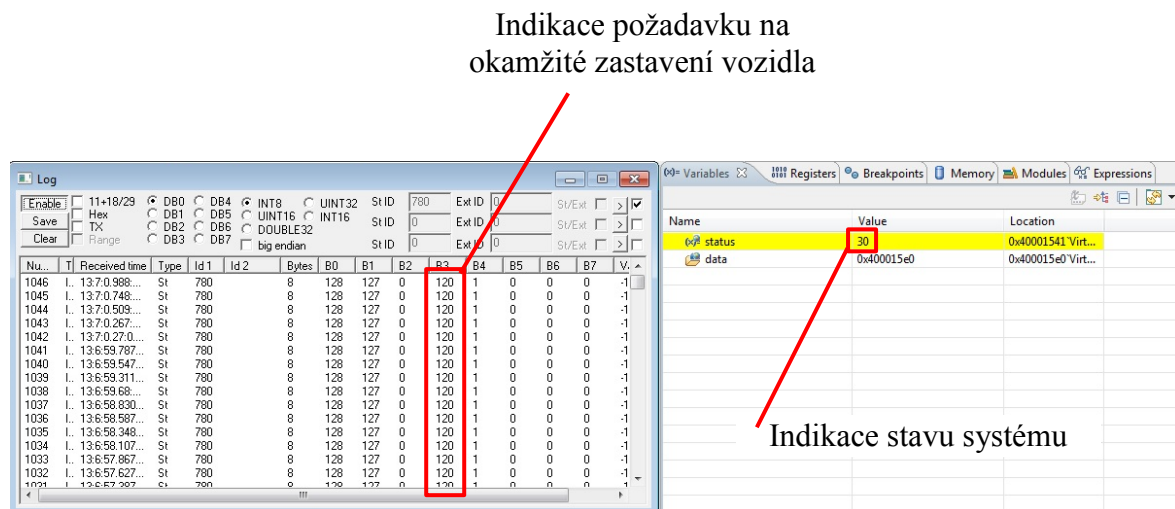
Obrázek 33: Odezva systému na skokovou změnu žádaného úhlu natočení kol při různém nastavení regulátoru

Pomocí osciloskopu byla zachycena komunikace skrze sériovou sběrnici RS 485 mezi kontrolérem R356 a ŘJ SCU. Dle časové prodlevy mezi zasíláním jednotlivých příkazů kontroléru R356 byla zjištěna doba trvání hlavní smyčky navrhnutého algoritmu obslužného programu SCU. Z obrázku č. 34 je patrné, že jeden regulační cyklus trvá cca 15 ms.



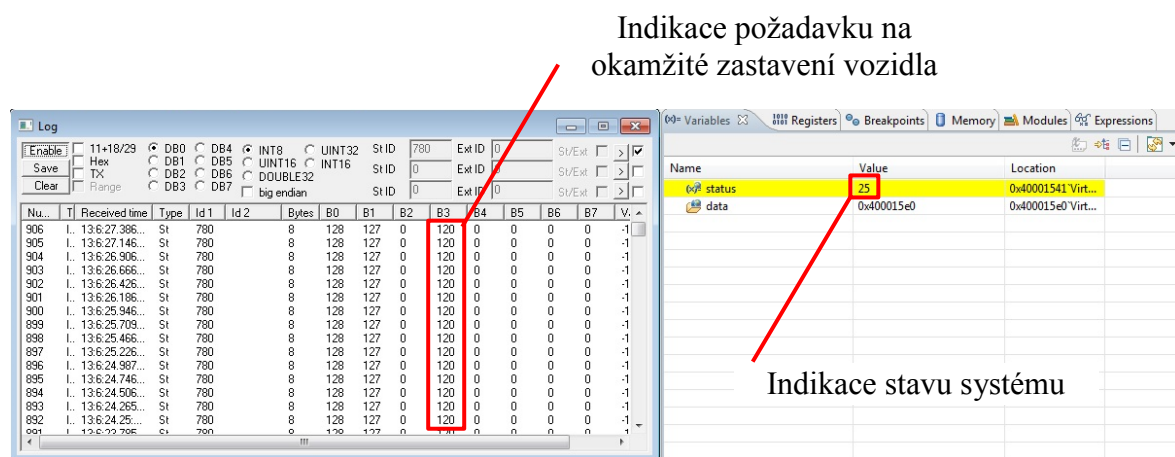
Obrázek 34: Záznam komunikace ŘJ SCU a kontroléru R356

Činnost funkcí zajišťujících bezpečnost provozu elektromobilu Democar byla ověřena pomocí simulace poruch, které mohou nastat při provozu elektromobilu. Jedná se o ztrátu napájení posilovače řízení, ztrátu inicializace nulové polohy a ztrátu napájení kontroléru R356.



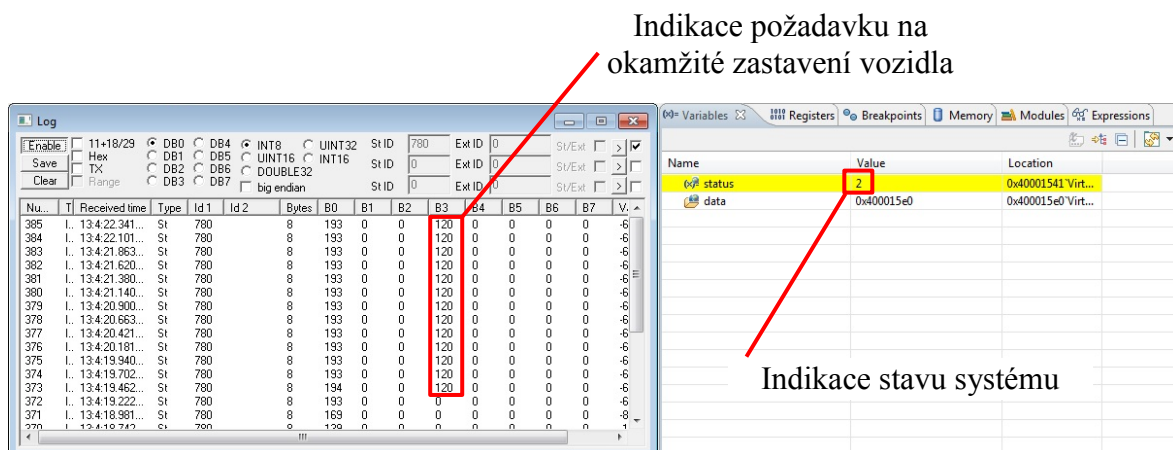
Obrázek 35: Chyba celého systému

Na obrázku č. 35 je patrné chování systému pokud dojde ke ztrátě napájení kontroléru R356 i posilovače řízení. Proměnná *status* nabývá hodnoty 30. Zároveň ŘJ SCU vyšle neprodleně na globální sběrnici CAN, kterou využívají všechny ŘJ vozidla, informaci k neprodlenému zastavení vozidla.



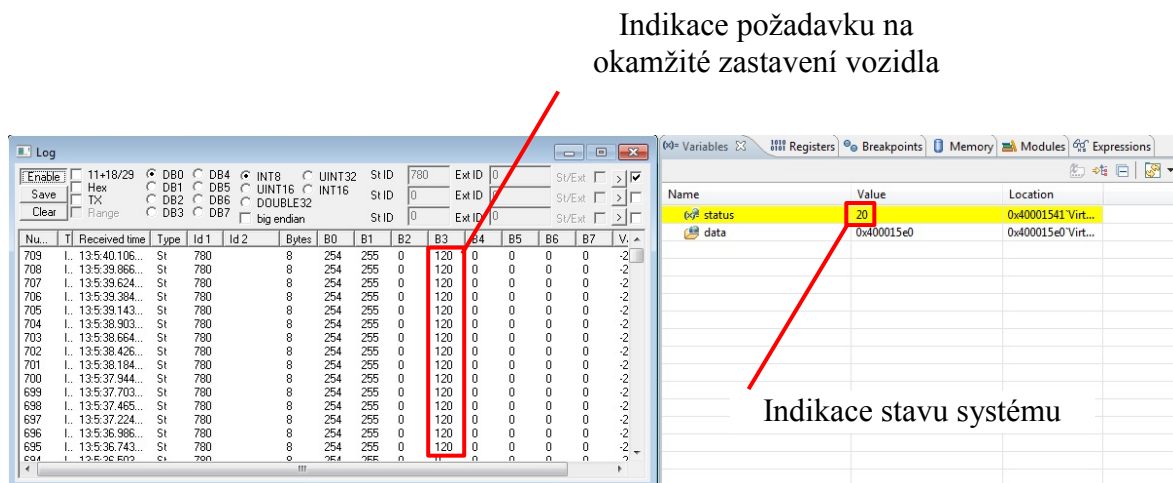
Obrázek 36: Chyba inicializace posilovače řízení

Obrázek č. 36 znázorňuje chování systému při ztrátě inicializace nulové polohy posilovače řízení. V tomto stavu není možné pokračovat v jízdě a opět je na globální sběrnici CAN vyslán příznak pro okamžité zastavení vozidla. Proměnná *status* v tomto případě nabývá hodnoty 25.



Obrázek 37: Chyba inicializace kontroléru R356

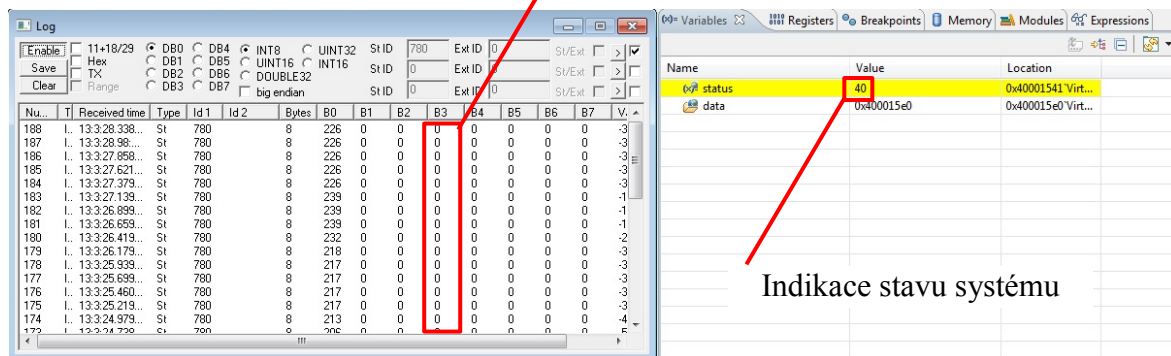
Při ztrátě inicializace kontroléru R356, například při krátkodobém výpadku napájení tohoto kontroléru, nabývá proměnná *status* hodnoty 2 a opět je vyslána informace k okamžitému zastavení vozidla na globální sběrnici CAN.



Obrázek 38: Porucha posilovače řízení

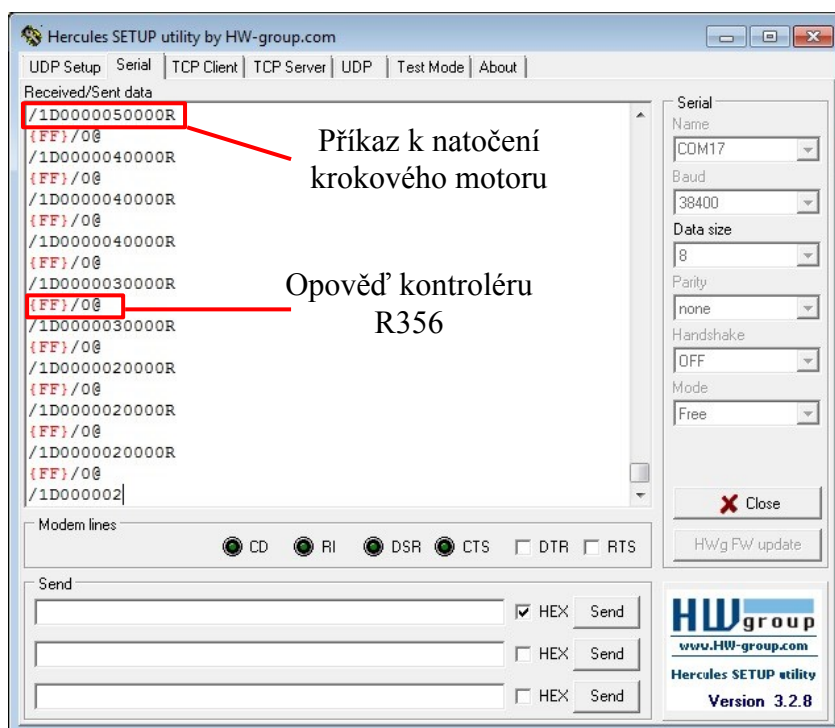
Při poruše posilovače řízení, kdy s posilovačem řízení není navázána komunikace, nabývá proměnná *status* hodnoty 20. Opět je vyslána informace k okamžitému zastavení vozidla na globální sběrnici CAN.

Indikace systém je v pořádku



Obrázek 39: Všechny systémy funkční

Na obrázku č. 39 je uvedena situace, kdy jsou všechny systémy funkční, proměnná *status* nabývá hodnoty 40 a na globální sběrnici CAN není vysílána informace k zastavení vozidla. Na obrázku č. 40 je uvedena zachycená komunikace mezi ŘJ SCU a kontrolérem R485 skrze sériovou sběrnici RS485 v případě, že jsou všechny komponenty systému funkční a správně inicializovány. Záznam komunikace byl vytvořen pomocí software Hercules.



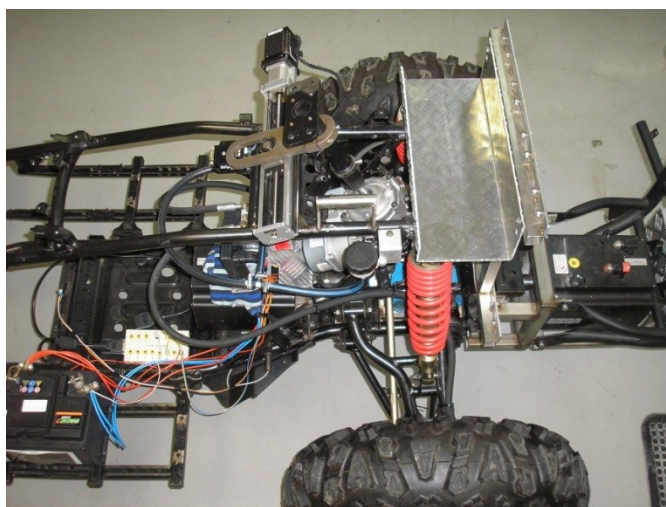
Obrázek 40: Záznam komunikace ŘJ SCU a kontroléru R356 skrze sběrnici RS485

7 Závěr

Diplomová práce navazuje na předchozí práce, které se již otázkou servořízení pro elektromobil Democar zabývaly. V praxi se ukázalo, že je zapotřebí stávající řešení vhodně rozšířit, aby byla zaručena dobrá dynamika systému servořízení vozidla. Stávající koncept byl proto rozšířen o elektronický posilovač řízení, díky němuž bylo dosaženo zvýšení krouticího momentu působícího na rejdové čepy řiditelné přední nápravy. Vzhledem k tomuto navýšení došlo ke snížení požadavku na krouticí moment ovládacího krokového motoru systému servořízení. Ten může nyní dosahovat větší rychlosti otáčení za použití menší hodnoty mikrokrokování.

V úvodní části je vybraný posilovač řízení firmy MOBIS podrobně analyzován po stránce konstrukce, možné komunikace, posilovacího účinku. Byly provedeny teoretické výpočty potřebných sil v mechanismu řízení a zabudování posilovače do šasi vozidla. Implementace elektronického posilovače řízení do konceptu servořízení elektromobilu Democar přinesla především zlepšení dynamiky systému. S využitím integrovaného snímače úhlu natočení kol byla odstraněna zdlouhavá inicializace systému a rovněž nehrozí ztráta informace o poloze natočení kol.

Druhá část této práce se zabývá vývojem software pro ŘJ SCU. Původní návrh obslužného software systému servořízení byl kompletně přepracován. Nově byla zavedena komunikace a spolupráce s řídícími jednotkami elektropohonu (DCU), brzd (BCU) a světel (LCU). Díky této spolupráci řídících jednotek mohly být navrženy a implementovány bezpečnostní funkce, které při poruše systému iniciují okamžité zastavení vozidla.



Obrázek 41: Celkový pohled na zabudovaný systém servořízení s elektronickým posilovačem řízení

8 Literatura

- [1] FORMÁNEK, Jakub. *Návrh a praktická realizace elektronického servořízení*. Ostrava, 2013. Diplomová práce. Vysoká škola báňská — Technická univerzita Ostrava. Vedoucí práce Ing. Petr Šimoník, Ph.D.
- [2] KOVÁČ, Jiří. *Návrh a realizace systému servořízení demonstračního vozidla s elektrickým pohonem*. Ostrava, 2013. Diplomová práce. Vysoká škola báňská — Technická univerzita Ostrava. Vedoucí práce Ing. Petr Šimoník, Ph.D.
- [3] TOMÁŠ, Osička. *Technologie vnitřní a uživatelské diagnostiky demonstračního vozidla s elektrickým pohonem Democar*. Ostrava, 2015. Diplomová práce. Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava. Vedoucí práce Ing. Petr Šimoník, Ph.D.
- [4] Electronic Components Datasheet Search. *Alldatasheet.com* [online]. 2016 [cit. 2016-04-25]. Dostupné z: <http://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/310177/FREESCALE/MPC5643L.html>
- [5] Co umožňuje a programátorovi přináší RTOS MQX od Freescale ? – 1.díl. *Vyvoj.hw.cz: Profesionální elektronika* [online]. 2011 [cit. 2016-04-25]. Dostupné z: <http://vyvoj.hw.cz/novinky/freescale/co-umoznuje-a-programatorovi-prinasi-rtos-mqx-od-freescale-1dil.html>
- [6] VLK, František. *Elektronické systémy motorových vozidel*. 1. vyd. Brno: František Vlk, 2002, 592 s. ISBN 80-238-7282-6.
- [7] Prezentace katedry 430. *VŠB-TUO* [online]. Ostrava, 2013 [cit. 2016-04-25]. Dostupné z: http://feil.vsb.cz/kat430/data/Prezentace_katedry/4_Elektro-ctyrkolka_DemoCar.pdf
- [8] CHONAN TECHNICAL SERVICE TRAINING CENTER. *MDPS: Motor Driven Power Steering* [online]. In: . s. 14 [cit. 2016-01-31]. Dostupné z: <http://www.kia-bg.com/docs/ceed/ED%20MDPS.pdf>
- [9] Teorie krimpování. *SPL Systém* [online]. 2012 [cit. 2016-05-03]. Dostupné z: <http://www.spl.cz/krimpovani/id-135>

- [10] SERVODRIVE: KROKOVÝ MOTOR 5718L-01P.: [online]. [cit. 2016-03-19].
Dostupné z: http://www.servo-drive.cz/krokove_motory/krokovy_motor_5718L-01P.php

- [11] Commands List for R356. In: *Lin Engineering: The Step Motor Specialists* [online]. 2009 [cit. 2016-05-08]. Dostupné z: http://www.linengineering.com/wp-content/uploads/downloads/R356/documentation/Silverpak23C_R356_Commands.pdf

- [12] HALLIDAY, David, Robert RESNICK a Jearl WALKER. *Fyzika: Vysokoškolská učebnice obecné fyziky*. První. Brno: VUTIUM, 1997, 1198 s. ISBN 80-214-1869-9.

- [13] WOLF, Ondřej. *Sestavení funkční koncepce a vývoj aplikačního software elektronického systému pohonu 4x4 elektromobilu Democar*. Ostrava, 2016. Diplomová práce. Vysoká škola báňská — Technická univerzita Ostrava. Vedoucí práce Ing. Petr Šimoník, Ph.D.

- [14] MIKULČÁK, Jiří et al. *Matematické fyzikální a chemické tabulky pro střední školy*. 3. vydání. Praha: Prometheus, 2004, 206 s. ISBN 80-858449-84-4.

- [15] KLIMEŠ, Cyril. *Principy výstavby počítačů a operačních systémů*. Ostrava: KOVOSIL Ostrava, 2007, 198 s. ISBN 978-80-903694-1-2.

9 Seznam příloh

Příloha A – CD s textem diplomové práce